

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOLOGIA VEGETAL

LUANA MORATI CAMPOS

RESPOSTAS DE CAFÉ CONILON À CONCENTRAÇÃO DE FERRO

VITÓRIA

2014

LUANA MORATI CAMPOS

RESPOSTAS DE CAFÉ CONILON À CONCENTRAÇÃO DE FERRO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biologia Vegetal do Centro de Ciências Humanas e Naturais da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do Grau de Mestre em Biologia Vegetal.

Orientador: Profa. Dra. Camilla Rozindo Dias Milanez

VITÓRIA

2014

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

Campos, Luana Morati, 1989-

C198r Respostas de café conilon à concentração de ferro / Luana Morati Campos. – 2014.

45 f. : il.

Orientador: Camilla Rozindo Dias Milanez.

Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Humanas e Naturais.

1. Anatomia vegetal. 2. Fisiologia vegetal. 3. Café - Irrigação. 4. Café conilon. 5. Toxidez. I. Milanez, Camilla Rozindo Dias. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Humanas e Naturais. III. Título.

CDU: 57

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Biologia Vegetal (PPGBV) da Universidade Federal do Espírito Santo pela infraestrutura.

Ao Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER) de Marilândia pelo fornecimento das mudas e ao Roque pela grande ajuda com o transporte das mesmas.

À Profa. Dra. Camilla Rozindo Dias Milanez, pela orientação fundamental para a realização deste estudo.

Aos Professores Dr. Geraldo Rogério Faustini Cuzzuol e Dra. Glória Maria de Farias Viégas Aquije por terem aceitado o convite para a banca.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado fornecida.

À Bete da equipe de apoio.

Aos amigos de mestrado e de laboratório Ana, Hiulana, João, Marina e Mariana, principalmente à Dayana, à Tatiane e ao Fabiano pela grande colaboração na execução dos experimentos.

Ao Leonardo, em especial, pelo companheirismo, amizade e imensa ajuda desde a ideia do projeto, execução de todos os experimentos até a interpretação dos resultados. Sua participação foi imprescindível para a realização deste trabalho.

À minha amiga Magda pelo auxílio no plantio das mudas.

Aos meus pais Jorge e Tânia por todo amparo nos experimentos, incentivo e amor.

A Deus por todas as bênçãos recebidas.

A todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a realização do trabalho.

A todos, muito obrigada!

RESUMO

RESPOSTAS DE CAFÉ CONILON À CONCENTRAÇÃO DE FERRO

O ferro (Fe) é um elemento essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Entretanto, está frequentemente presente nas águas subterrâneas utilizadas na irrigação em concentrações que podem causar fitotoxidez ao longo do tempo. No presente estudo, foi investigado o efeito de doses de Fe em diferentes análises, a saber: crescimento radicular, concentração mineral das folhas, extravasamento de eletrólitos, teores de pigmentos fotossintéticos, fotossíntese, anatomia foliar e radicular e sintomas visuais de toxidez de plantas de *Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner cv. Conilon. As mudas foram tratadas por 30 dias pela adição de 0 (controle), 10, 40, 120, 200 e 400 mg/L de Fe fornecidos como $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ mais sal EDTA no solo. A massa seca das raízes mostrou valores menores sob a maior dose de Fe. Plantas sob a dose maior de Fe apresentaram maior acúmulo foliar deste elemento. O maior teor de boro (B) ocorreu nos indivíduos sob a dose de 400 mg/L quando comparado às doses de 40 mg/L e 200 mg/L. Os teores de fósforo (P) não diferiram e foram menores nas doses de 120, 200 e 400 mg/L de Fe quando comparados ao controle. As concentrações foliares de potássio (K) foram maiores em 10, 40, 120, 200 e 400 mg/L de Fe. As maiores concentrações de zinco (Zn) foliar foram encontradas nas plantas submetidas a 120, 200 e 400 mg/L de Fe em relação ao controle e à dose de 10 mg/L de Fe. O extravasamento de eletrólitos foi maior nas plantas sob 400 mg/L de Fe em relação à dose de 40 mg/L, porém não diferiu das demais doses. Não houve diferença significativa quanto aos teores de pigmentos fotossintéticos e os parâmetros de clorofila *a*. As plantas controle mostraram maior fotossíntese, condutância estomática e transpiração, sendo as menores taxas encontradas no tratamento a 200 mg/L Fe. A concentração de carbono interno foi maior nas plantas sob 400mg/L de Fe. Foi observada necrose nas folhas maduras sob a maior dose de Fe. As espessuras da face adaxial da epiderme, do parênquima esponjoso e total do limbo não diferiram entre os tratamentos. A espessura do parênquima paliçádico foi menor para a dose de 400 mg/L em relação às doses de 120 e de 200 mg/L e a espessura da face abaxial da epiderme foi maior no controle quando comparada com a dose de 40 mg/L. No tratamento com maior teor de Fe verificou-se alteração na morfologia das raízes, como a redução no crescimento e na emissão de raízes laterais. Houve também maior lignificação da epiderme e do córtex; algumas células corticais apresentaram alteração do formato, com retração do

protoplasto. De modo geral, os resultados obtidos indicam que a dose de 400 mg/L de Fe é nociva, afetando a estrutura e a funcionalidade da variedade Conilon.

Palavras-chave: Anatomia, *Coffea canephora*, fisiologia, irrigação, toxidez.

ABSTRACT

CONILON COFFEE RESPONSES TO IRON CONCENTRATION

Iron (Fe) is an essential element for the growth and development of plants. However, it is often present in groundwater used for irrigation at concentrations that may cause phytotoxicity over time. In this study, the effect of doses of Fe on root growth, mineral concentration of leaves, electrolyte leakage, photosynthetic pigments content, photosynthesis, leaf and root anatomy and toxicity symptoms in plants of *Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner cv. Conilon was investigated. The seedlings were treated for 30 days by the addition of 0 (control), 10, 40, 120, 200 and 400 mg/L of $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ provided as Fe EDTA more salt in the soil. The dry mass of roots showed lower values under the highest dose of Fe. Plants under the highest dose of Fe showed higher leaf accumulation of this element. The higher content of boron (B) occurred in individuals at the dose of 400 mg/L compared to the doses of 40 mg/L and 200 mg/L. Phosphorus (P) contents did not differ and were lower at the doses of 120, 200 and 400 mg/L Fe when compared to control. The leaf potassium (K) concentrations were higher at 10, 40, 120, 200 and 400 mg/L Fe. The highest zinc (Zn) leaf contents were found in plants subjected to 120, 200 and 400 mg/L of Fe in relation to the control and the dose of 10 mg/L of Fe. Electrolyte leakage was higher in plants under 400 mg/L of Fe compared to dose of 40 mg/L, however did not differ from the others doses. There was no significant difference in the levels of photosynthetic pigments and parameters of chlorophyll *a*. The control plants showed higher photosynthesis, stomatal conductance and transpiration, and the lowest rates were found at 200 mg/L Fe. Internal carbon concentration was higher in plants under 400mg/L of Fe. Necrosis was observed in mature leaves under higher dose of Fe. Adaxial epidermis, spongy parenchyma and limb thickness did not show differences between the different treatments. The palisade parenchyma thickness was lower at 400 mg/L compared to the doses of 120 and 200 mg/L and adaxial epidermis thickness was higher compared to the dose of 40 mg/L. In the treatment with higher Fe content there was a change in the morphology of roots, such as reduced growth and emission of lateral roots. There was also an increased lignification of the epidermis and cortex; some cortical cells showed format changes, with protoplast retraction. Overall, the results indicate that the dose of 400 mg/L Fe is harmful, affecting the structure and functionality of Conilon variety.

Keywords: Anatomy, *Coffea canephora*, irrigation, physiology, toxicity.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1	Ferro e sua relação com a planta	9
2.2	Água: importância e qualidade	11
2.3	Descrição de <i>Coffea canephora</i>	13
2.4	Importância econômica e social de <i>Coffea canephora</i>	14
3	HIPÓTESES	16
4	OBJETIVOS	16
4.1	Objetivo geral	16
4.2	Objetivos específicos	16
5	MATERIAL E MÉTODOS	17
5.1	Local do experimento	17
5.2	Material vegetal e condições de cultivo	17
5.3	Delineamento experimental	17
5.4	Análises de crescimento	17
5.5	Análise de macronutrientes e micronutrientes	18
5.6	Análise físico-química do solo	18
5.7	Tolerância protoplasmática	19
5.8	Teores de pigmentos fotossintéticos	19
5.9	Cinética de emissão da fluorescência transiente (OJIP)	20
5.10	Trocas gasosas e assimilação líquida de CO ₂	20
5.11	Anatomia foliar, anatomia radicular e testes histoquímicos	21
5.12	Morfologia	21
5.13	Análise estatística	21
6	RESULTADOS	22
6.1	Análises de crescimento	22
6.2	Análise de macronutrientes e micronutrientes	22
6.3	Tolerância protoplasmática	23
6.4	Teores de pigmentos fotossintéticos	23
6.5	Fotoquímica e trocas gasosas	24
6.6	Anatomia foliar e testes histoquímicos	25
6.7	Morfologia	26
7	DISCUSSÃO	28
7.1	Análises de crescimento	28
7.2	Análises de macronutrientes e micronutrientes	28
7.3	Tolerância protoplasmática	29
7.4	Teores de pigmentos fotossintéticos	29
7.5	Cinética de emissão da fluorescência transiente e trocas gasosas	30
7.6	Anatomia foliar e radicular	30
7.7	Morfologia foliar	31
8	CONCLUSÃO	32
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33
10	ANEXO	44

1. INTRODUÇÃO

O café é considerado o principal produto no mercado agrícola mundial e gera mais de 90 bilhões de dólares por ano, sendo ultrapassado apenas pelo petróleo, quando se trata de produtos naturais (DAMATTA et al., 2010). Atualmente, o Brasil é o maior produtor, responsável por 36,7% (USDA, 2013) e o Espírito Santo o segundo estado com maior produção, conforme a Conab (2014). Embora existam mais de 100 espécies do gênero *Coffea*, somente *Coffea arabica* L. e *Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner possuem importância econômica, respondendo por 58% e pelo restante do café produzido, respectivamente (USDA, 2013).

C. canephora é uma espécie arbustiva, perene e com caule lenhoso (FERRÃO et al., 2007a) sendo cultivada em regiões com menor altitude e temperaturas altas (MATIELLO, 1991). No Espírito Santo, o seu cultivo tem se expandido para áreas mais secas (RONCHI e DAMATTA, 2007) onde a utilização da irrigação é fundamental para garantir a alta produtividade do cafeeiro (SILVA e REIS, 2007).

A água juntamente com as condições nutricionais do solo são fatores ambientais que interferem no crescimento e no desempenho de uma espécie (BRAY et al., 2000; SILVA e REIS, 2007) influenciando a produtividade e a qualidade da produção. Sabe-se que para o café Conilon os elementos boro, zinco, cobre, manganês e ferro estão entre os micronutrientes mais requeridos. Para este último, valores no solo abaixo de 20 mg/dm³ são considerados baixos, entre 20 e 30 mg/dm³ médios e acima de 30 mg/dm³, altos (PREZOTTI et al., 2007).

As águas utilizadas para irrigação normalmente são de origem superficial (rios, córregos e lagos) ou subterrânea (poços) (SOUTO, 2005; ALMEIDA, 2010). No Brasil, principalmente em períodos de estiagem, esses recursos hídricos frequentemente apresentam concentrações elevadas de ferro total, uma vez que a maioria dos solos é composto por óxidos de ferro sob variadas formas. Além disso, a manipulação não adequada dos solos e o desmatamento têm contribuído para o assoreamento dos mananciais, o que eleva os teores de ferro nas águas (ALVES, 2008). Conforme Ayers e Westcot (1976), a qualidade da água para irrigação está relacionada a seus efeitos danosos às culturas, bem como ao solo, requerendo muitas vezes técnicas específicas de manejo para controlar ou compensar eventuais problemas associados a sua utilização. Nesse sentido, procedimentos que objetivam retirar o ferro da água levam em consideração à filtração do ferro trivalente após a oxidação do ferro bivalente via aeração ou cloração da água (AIROLDI, 2003). Entretanto, estas técnicas não têm se mostrado capazes de oxidar totalmente o ferro bivalente (ALVES, 2008).

A irrigação do cafeeiro no Espírito Santo tem sido realizada, preferencialmente, com o uso de sistemas pressurizados por aspersão ou localizados (SILVA e REIS, 2007). Problemas com o ferro presente nesses sistemas ou na água são relatados na literatura, pois com o avanço da utilização da irrigação localizada, a perda de desempenho de equipamentos devido à presença de ferro e sólidos em suspensão é ocorrente (SILVA et al., 2011). No entanto, pouco se fala sobre o prejuízo que o ferro pode vir a causar aos cultivos irrigados com águas contendo excesso desse elemento.

O ferro é um micronutriente essencial para o crescimento e desenvolvimento normal das plantas (KERBAUY, 2004). É parte integrante do centro de oxirredução de inúmeras enzimas e moléculas de grande importância no metabolismo vegetal, como citocromos, nitrogenases e enzimas envolvidas na síntese de clorofila (TAIZ e ZEIGER, 1998). Contudo, a presença desse elemento na água de irrigação acima do recomendado para as plantas em geral, ou seja, superior a 5mg/L, pode prejudicar as culturas irrigadas em longo prazo, uma vez que poderá dar origem a um aumento progressivo desse elemento no solo, até alcançar um nível capaz de provocar fitotoxidez (PRATT, 1972; ROWE e ABDEL, 1995). Como consequência, podem ocorrer injúrias nas células da epiderme e do parênquima clorofiliano (MULLER, 2011), estresse oxidativo com produção de espécies reativas de oxigênio (ERO's) (RAVET et al., 2009), danos fotossintéticos (SUH et al., 2002), além de poder afetar a estabilidade da membrana plasmática (FANG et al., 2001) e causar sintomas visuais de fitotoxidez nas folhas (CHATTERJEE et al., 2006).

Assim, as plantas tolerantes ao Fe utilizam distintas estratégias, seja por meio de modificações fisiológicas ou morfológicas para manter seu metabolismo e crescimento (KUKI et al., 2008, NEVES et al., 2009; MULLER, 2011). Neste sentido, estudos que forneçam detalhes sobre as respostas funcionais e estruturais de *C. canephora* ao ferro contribuem com informações relevantes sobre a capacidade de tolerância das plantas a esse elemento. Isso pode auxiliar o agricultor no manejo da cultura ao considerar os fatores qualidade da água de irrigação e adubação do solo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ferro e sua relação com a planta

O Fe é um elemento químico com número atômico 26 e massa atômica 55,85 u. Está presente nas rochas, solos, águas, organismos e aerossóis, e desempenha um papel fundamental nos processos biogeoquímicos (REDDY, 2008). Cerca de 4,2% da litosfera são constituídos por Fe, sendo hematita, magnetita, goethita e siderita os principais minerais que contêm Fe. Embora abundante na crosta terrestre, o ferro está presente no solo, quase exclusivamente, na forma oxidada Fe^{3+} , que tem uma solubilidade muito baixa em água.

No Brasil, são comuns águas com teor elevado de ferro (RICHTER e NETO, 1991), encontrados com maior frequência em águas superficiais, águas poluídas por certos resíduos industriais ou algumas atividades de mineração e águas subterrâneas, como poços, fontes e galerias de infiltração. Nessas últimas, muito utilizadas em sistemas de irrigação na agricultura, o ferro se encontra no estado dissolvido sob a forma Fe^{2+} , $\text{Fe}(\text{OH})^+$ ou na forma de quelatos (MORUZZI, 2000). Embora o ferro apresente diferentes estados de oxidação, a forma bivalente é a forma mais biodisponível para as plantas, já que é mais solúvel (KIM e GUERINOT, 2007).

O Fe é o quarto elemento mais abundante na crosta terrestre e envolve-se na maior parte dos processos fisiológicos dos organismos tais como fotossíntese, respiração, fixação biológica de nitrogênio (GURZĂU et al., 2003) e síntese de DNA e hormônios (BECANA et al. 1998; BRIAT e LOBRÉAUX, 1997). Desse modo, o ferro é um micronutriente fundamental para o crescimento e desenvolvimento das plantas (KERBAUY, 2004), estando também relacionado a importantes funções metabólicas, como biossíntese de clorofila e de diversas proteínas (MARSCHNER, 1999).

Existem dois processos de absorção do ferro pelos vegetais (RÖMHELD e MARSCHNER, 1986a,b; ROGERS e GUERINOT, 2002). No primeiro, característico de dicotiledôneas e monocotiledôneas não gramíneas, ocorre uma acidificação da rizosfera pela liberação de prótons. Assim, os íons férricos (Fe^{3+}) são reduzidos aos íons ferrosos (Fe^{2+}) na membrana plasmática das células da raiz, por uma redutase de Fe^{3+} e, posteriormente, são transportados através da membrana plasmática por um sistema transportador específico. O segundo mecanismo, comum às gramíneas, envolve a expulsão de sideróforos pela raiz, que formam um complexo com o íon férrico, não ocorrendo, nesse caso, sua transformação para Fe^{2+} . O complexo Fe^{3+} -sideróforo é transportado para o interior da planta através da membrana plasmática.

Dentre os metais, isto é, aqueles de alta densidade (acima de 5 g/cm^3) que são potencialmente tóxicos na forma de íons (EPSTEIN e BLOOM, 2006), o ferro é considerado um metal não crítico em relação à toxicidade na fauna e na flora (MCBRIDE, 1994; OLIVER, 1997). Ademais, sua translocação no tecido vegetal tem sido considerada baixa (GHALY et al. 2008) devido à baixa remobilização no floema (BAUER e HELL, 2006).

Contudo, são inúmeros os fatores que interferem na disponibilidade/mobilidade de metais inclusive do Fe. Alguns deles são: pH, nível de oxigênio, teor de matéria orgânica, quantidade de argila e potencial redox (PIERANGELI et al., 2001). Além da concentração do íon em questão, a magnitude do dano depende também do tempo de exposição, da sensibilidade das plantas, do uso da água pelas culturas e do tipo de irrigação (AMORIM, 2013).

Seu excesso, contudo, pode gerar: injúrias nas células da epiderme e do parênquima clorofiliano, com redução na espessura do mesofilo (MULLER, 2011); conteúdo de clorofila menor (CHATTERJEE et al., 2006); desequilíbrio nutricional (ALMEIDA, 2010) estresse oxidativo com produção de ERO's (Connolly e Guerinot, 2002); danos fotossintéticos (SUH et al., 2002); instabilidade da membrana (THOMPSON e LEDGE, 1987; FANG et al., 2001); clorose nas folhas velhas (CHATTERJEE et al., 2006), escurecimento das raízes (SAHRAWAT, 2005) e inibição do crescimento da planta (CHATTERJEE et al., 2006). Além disso, níveis acima de 0,3 ppm de ferro podem causar manchas de ferrugem e descoloração na folhagem de plantas irrigadas por aspersão (ZINATI e SHUAI, 2005). O excesso de ferro pode ainda danificar lipídios, proteínas e DNA pela formação de radicais hidroxila na reação de Feton (CONNOLLY e GUERINOT, 2002).

Concentrações normais de ferro variam entre 30 e 300 $\mu\text{m/g}$ de massa seca. Em geral, concentrações acima de 500 $\mu\text{m/g}$ são consideradas tóxicas (PUGH et al., 2002), contudo isso depende da espécie, do estado fisiológico e das condições de crescimento (ADAMSKI et al., 2011). No cafeeiro, concentrações acima de 200 mg/kg são consideradas excessivas (WILSON, 1985).

Isso posto, a absorção de ferro em plantas é altamente regulada para impedir seu acúmulo em excesso (KIM e GUERINOT, 2007; TOSHIHIRO et al., 2010). Os mecanismos de proteção contra a toxidez por ferro na planta podem envolver: 1) mecanismos enzimáticos (FANG et al.; 2001), como aumento na atividade das enzimas antioxidantes (dismutase do superóxido, catalase e peroxidase do ascorbato), as quais agem na supressão de (EROs) (BECANA et al.; 1998); e 2) mecanismos não-enzimáticos, como os carotenoides, que agem também na eliminação de EROs (EDGE et al.; 1997; POLYAKOV et al.; 2001; KRINSKY e

YEUM, 2003; SMIRNOFF, 2005;). Pode ocorrer ainda a compartimentalização do metal em organelas, como vacúolos e plastídios, e também em ferritina, uma proteína especializada (MURGIA et al., 2002; CURIE e BRIAT, 2003; BRIAT et al.; 1995; 2007; 2010) que mantém a homeostase do ferro nas células (MAJERUS et al.; 2009).

2.2 Água: importância e qualidade

Os recursos hídricos são utilizados com diferentes objetivos, entre os quais se destacam o abastecimento de água, a geração de energia, a irrigação, a navegação, a aquicultura e a harmonia paisagística (SPERLING, 1993). A água representa, sobretudo, o principal constituinte dos seres vivos, inclusive do homem.

O volume total de água na terra é estimado na ordem de 523 milhões de km³ dos quais 97,2% estão nos oceanos e mares interiores, 2,2% nos gelos polares e nas geleiras montanhosas e 0,6% em rios, lagos e lençóis subterrâneos (ENCYCLOPEDIA BRITANNICA, 1974).

Rotstein (1996) afirma que o Brasil, apesar de apresentar recursos hídricos mal distribuídos, é um país potencialmente rico em água e, conseqüentemente, tem terras agricultáveis no seu imenso espaço geográfico. A água utilizada na irrigação de culturas tem sua origem superficial ou de lençóis freáticos (ALMEIDA, 2010) e pode ser obtida por meio de rios, barragens e poços (SILVA et al., 2011).

Segundo Tundisi (2003), a produção de alimentos é a atividade que mais utiliza água no mundo, isso devido especialmente à irrigação. No Brasil a situação não é diferente, já que a agricultura é a que mais emprega esse recurso (OLIVEIRA, 2010). Segundo Bernardo et al., (2006), a irrigação é uma tática que eleva a rentabilidade da propriedade agrícola por meio do aumento da produção.

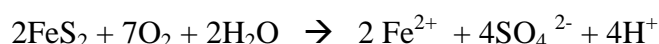
O consumo de água no mundo tem aumentado muito, devido ao crescimento populacional, que conduz o desenvolvimento industrial e a necessidade do aumento na produção de alimentos. Pressupõe-se que até o ano 2025, a irrigação expandir-se-á entre 20 a 30% para atender a crescente demanda por alimento (LIMA e CHAVES, 2008).

A agricultura irrigada é dependente da quantidade e da qualidade da água. Todavia, hoje, tem-se recorrido às águas de qualidade inferior para evitar a falta de água no futuro (AYERS e WESTCOT, 1991).

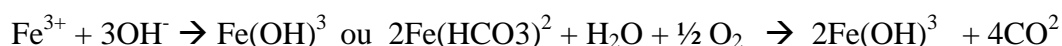
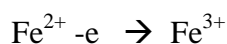
A água é um recurso natural renovável, porém a poluição e o desperdício estão mudando a qualidade dessa ao longo dos tempos, o que a torna escassa em alguns lugares (ROTSTEIN, 1996). O termo “qualidade de água” não se refere a um estado de pureza, mas

às características físicas, químicas e biológicas, que indicarão as diferentes utilidades para água (LIMA e CHAVES, 2008). No caso da irrigação, ela não pode conter sais e íons específicos em excesso para não prejudicar as plantas e o solo, mas também não pode conter substâncias dissolvidas que possam acarretar obstrução de sistemas de irrigação localizada pela formação de precipitados químicos (LIMA, 1999; BERNARDO, 2005; GRIEVE et al., 2006; KARAIVAZOGLU et al., 2005; ALMEIDA 2010;).

Conforme Ayers e Wescot (1991), quase todas as águas possuem Fe, Mn, Mo e Zn em quantidades que não ultrapassam alguns mg/L, não se apresentando tóxicos, e sim essenciais para o desenvolvimento dos vegetais. No caso do ferro, esse está presente nos solos e nos minerais pirita, magnetita, biotita e piroxênios, geralmente em forma insolúveis, como óxido de ferro (FeO) e também é encontrado como carbonato de ferro, que é solúvel. A água contendo oxigênio penetra no solo e atinge as águas subterrâneas podendo ocasionar um aumento na concentração do ferro, acarretando oxidação da pirita (FeS₂), forma insolúvel de ferro, formando sulfato de ferro solúvel, como mostrado na seguinte equação:



Segundo Da Costa (2000), as águas com Fe, em contato com o ar, turvam-se pela formação do hidróxido férrico – Fe(OH)³, insolúvel, como nas equações:



No Brasil, os recursos hídricos apresentam concentrações altas de ferro total (ALVES, 2008), principalmente em períodos sem chuva. Além do mais, o manejo não adequado dos solos e o desmatamento têm contribuído para o assoreamento das fontes de água, elevando as concentrações de ferro nas águas (ALVES, 2008).

A água contendo ferro não é prejudicial ao homem, contudo quando ultrapassados o limite de 0,3 mg/L a água perde as características estéticas, o sabor fica ruim e a cor amarelada (LIMA e CHAVES, 2008). Quanto a qualidade da água para irrigação, de acordo com National Academy of Science (1972) e Pratt (1972), as concentrações máximas de 5,0 mg/L de Fe podem ser tóxicas à plantação ao longo do tempo, porém não oferece danos às plantas quando em solos com boa aeração, apesar de contribuir para a acidez e indisponibilidade de fósforo e molibdênio.

O Fe é encontrado em águas naturais em níveis que variam de 0,5 a 50 mg/L (MORUZZI, 2000). No norte do estado do Espírito Santo, onde o cultivo de café Conilon é muito intenso (FASSIO e SILVA, 2007), as águas subterrâneas utilizadas em sistemas de irrigação dessa cultura chegam a possuir cerca de 10,0 mg/L de Fe nos períodos mais secos do ano¹, o que ultrapassa o valor máximo recomendado de 5,0 mg/L, podendo, ao longo do tempo, originar um aumento progressivo desse elemento no solo até alcançar um nível capaz de provocar danos às plantas (PRATT, 1972). Sendo assim, o teor de Fe nas águas de irrigação é um fator que pode ocasionar uma preocupação não só quanto ao desempenho das culturas de café como dos plantios em geral, irrigados com águas com essa característica.

2.3 Descrição de *Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner

O gênero *Coffea*, pertence à família Rubiaceae e é composto por cerca de 80 espécies (BRIDSON, 1994), entretanto, da produção mundial de café, *Coffea canephora* e *Coffea arabica*, representam quase a totalidade (FERREIRA et al., 2005).

O café é originário da África, sendo *C. arabica* da Etiópia e *C. canephora* do Congo (ECCARDI e SANDALJ, 2002). Essa última, de ampla distribuição geográfica, é adaptada a regiões quentes e úmidas, e em áreas baixas da floresta tropical (CHARRIER e BERTHAUD, 1985).

A espécie *C. canephora*, conhecida como café Robusta, engloba diversas variedades, como “Kouilou”, “Robusta”, “Sankutu”, “Bakaba”, “Niaculi” e “Uganda” (CHAVALIER 1929;1944, citado por FERRÃO, 2004). Dessas, o “Kouilou”, conhecida no Brasil como Conilon, é a mais importante em nosso país pelo volume de produção e valor industrial.

A espécie *C. canephora* é alógama, perene, de porte arbustivo e caule lenhoso. As plantas sob temperatura e precipitação mais elevadas podem alcançar até 5 metros de altura.

As folhas são maiores e de coloração verde menos intensa que de *C. arabica*, elípticas, lanceoladas, com bordas bem onduladas e nervuras bem salientes. As flores são brancas, em grande número por inflorescência e por axila foliar. Os frutos apresentam formato e número variável conforme o material genético, com 30 a 60 por verticilo foliar, de superfície lisa, com exocarpo fino, mesocarpo aquoso e endocarpo delgado (FAZUOLI, 1986). Essa espécie é diploide, e possui populações expressando grande variabilidade, com indivíduos altamente heterozigotos (BERTHAUD, 1980). Além disso, é auto-incompatível (BERTHAUD, 1980), tropical e de floração gregária (ALVIM, 1973, citado por RENA e MAESTRI, 1986). No

¹ <Concentração de ferro na água de irrigação> - mensagem recebida por e-mail da CEPLAC <28/05/2013>.

entanto, a floração depende diretamente do crescimento dos ramos plagiotrópicos, em especial dos primários. As espécies de café possuem flores hermafroditas com estames aderentes ao tubo da corola. Nessa espécie alógama, na qual ocorre a autoincompatibilidade, a fecundação cruzada acontece após abertura das flores, e a polinização é realizada com auxílio de vento e de insetos.

Especificamente, a cultivar “Vitória Incaper 8142” de café Conilon é formada por 13 genótipos, selecionados entre os materiais genéticos do programa de melhoramento do Instituto Capixaba de Pesquisa e Assistência Técnica do Espírito Santo (INCAPER). Os clones foram avaliados em condições experimentais e apresentaram alta produtividade, estabilidade de produção, tolerância à seca, tolerância à ferrugem, uniformidade de maturação e grãos grandes (FERRÃO, 2007b).

2.4 Importância econômica e social de *Coffea canephora*

De acordo Fassio e Silva (2007), aproximadamente 36% da produção mundial de café são derivados de *C. canephora*. Os maiores produtores dessa espécie são Vietnã e Brasil, que representam 34,67% e 23,07% da produção mundial, respectivamente, sendo seguidos pela Indonésia, com 13,58%. No Brasil, o Espírito Santo é o maior produtor nacional (ANUÁRIO ESTATÍSTICO DO CAFÉ, 2002/2003). Quanto à exportação, o Brasil ocupa a terceira posição, segundo Organização Internacional do Café (OIC, 2014).

Conforme a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2006), o café é cultivado em 14 estados brasileiros mais o Distrito federal, porém a maior parte da produção concentra-se em Minas Gerais, Espírito Santo, São Paulo, Paraná, Bahia e Rondônia. Quando se considera o café Robusta, o Espírito Santo apresenta-se como o maior produtor respondendo por 72,45% da produção nacional, seguido por Rondônia, com 13,3%. Desse modo, devido ao Espírito Santo, o Brasil é o segundo maior produtor e terceiro maior exportador de robusta do mundo. Segundo Ferrão (2006), o parque cafeeiro de Conilon estende-se por uma área em produção superior a 285mil hectares apresentando cerca de 561 milhões de plantas.

No estado do Espírito Santo, *C. canephora* foi introduzida por volta de 1912, no município de Cachoeiro de Itapemerim, sendo posteriormente levada para a região norte do Estado (FERRÃO et al., 2007c), atualmente, a principal região produtora. Em relação aos municípios, constata-se que os principais produtores são Jaguaré, Sooretama, Linhares, Nova Venécia, Vila Valério, São Mateus, Rio bananal e Pinheiros (IBGE, 2005).

O desenvolvimento da cultura do café Conilon no Espírito Santo deve-se basicamente ao surgimento da indústria do café solúvel e, também, ao emprego dessa variedade em misturas com o arábica, o que forma os *blends* (TRISTÃO, 1995; FERRÃO, 2004). Isso porque o Conilon apresenta menor acidez e maior quantidade de sólidos solúveis (FERRÃO, 2004; BELING, 2005). Além disso, é uma ótima alternativa aos cafeicultores das regiões mais quentes e secas do Estado, menos habilitados ao cultivo do café arábica (DADALTO e BARBOSA, 1997).

No decurso dos últimos dez anos, a cafeicultura do Conilon passou por uma série de transformações, incluindo a evolução no nível técnico das lavouras. De uma maneira geral, o perfil empreendedor dos cafeicultores e as condições favoráveis de temperatura e topografia, permitiram a existência de uma cafeicultura muito bem desenvolvida, com o uso de irrigação e variedades melhoradas, favorecendo a cafeicultura nos municípios do norte do Estado (FASSIO e SILVA, 2007).

Assim, o cultivo do café Conilon representa a atividade mais importante da esfera agrícola capixaba, o que traz benefícios econômicos e também sociais, pela geração de empregos, distribuição de renda, além de fixar do homem na área rural (FASSIO e SILVA, 2007).

3. HIPÓTESES

Hipótese nula: indivíduos de *C. canephora* não apresentam variações no crescimento, teor de pigmentos, fotossíntese, extravasamento de eletrólitos e não possuem sintomas visuais de toxidez nas folhas sob a concentração maior de ferro. Hipótese alternativa: as plantas apresentam menor crescimento, menor teor de pigmentos fotossintéticos, menor taxa fotossintética, maior extravasamento de eletrólitos e necrose foliar sob a dose mais excessiva de ferro.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo geral

Avaliar as respostas morfológicas e fisiológicas de café Conilon submetido a diferentes doses de ferro.

4.2 Objetivos específicos

- Avaliar a biomassa radicular;
- Determinar os teores de macro e micronutrientes nas folhas;
- Indicar a tolerância protoplasmática celular;
- Determinar os teores de pigmentos fotossintéticos;
- Verificar a cinética de emissão da fluorescência transiente OJIP;
- Avaliar a fotossíntese, condutância estomática, transpiração e concentração interna de CO₂ em mudas de café;
- Analisar a anatomia foliar e radicular dos exemplares estudados;
- Detectar possíveis sintomas de toxidez ao excesso de ferro.
- Definir os teores de macro e micronutrientes do solo, após a adição de diferentes doses de ferro.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Local do experimento

O experimento foi desenvolvido na casa de vegetação no Setor de Botânica localizado no Campus Universitário de Goiabeiras da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória, ES.

5.2 Material vegetal e condições de cultivo

Foram utilizadas mudas clonais de *Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner cv. Conilon pertencente à variedade “Vitória Incaper 8142”, clone 11, com idade de cinco meses, obtidas por estaquia na Fazenda Experimental Incaper – Marilândia, ES. As mudas foram transferidas, em casa de vegetação, para vasos de polietileno com capacidade de 5 litros contendo solo Franco Argilo-Arenoso (Tabela 8 do anexo). A análise química do solo encontra-se na tabela 8 do anexo. Após um mês, as plantas foram submetidas, em uma única aplicação, a cinco doses diferentes de ferro, fornecido ao solo sob a forma $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ mais Na_2EDTA na quantidade de 400 mL de solução (capacidade de campo - CC) a saber: 0; 10; 40; 120; 200 e 400 mg/L. As plantas controle foram mantidas sem a adição de ferro no solo. Durante 30 dias, as plantas receberam irrigação a cada dois dias com água corrente observando a CC do substrato, para que não ocorresse lixiviação do ferro. Passado esse tempo, as plantas foram coletadas e avaliadas quanto ao crescimento das raízes, aos teores de micronutrientes e macronutrientes, à estabilidade da membrana celular, aos teores de pigmentos fotossintéticos, à fluorescência e a trocas gasosas, às características anatômicas foliares e à composição da parede e conteúdos celulares.

5.3 Delineamento experimental

O delineamento utilizado foi do tipo inteiramente casualizado, constituído de 6 doses de ferro x 1 espécie x 5 repetições para as análises anatomia foliar, teores de micro e macronutrientes e análise físico-química do solo ou 10 repetições para as demais análises, resultando em um total de 30 parcelas com cinco plantas cada, totalizando 150 indivíduos.

5.4 Análises de crescimento

Foram realizadas as medidas de massa fresca (g) e massa seca (g) das raízes. A massa seca foi obtida com a pesagem das amostras após as mesmas serem secas em estufa a 60°C, até a obtenção de massa constante.

5.5 Análise de macronutrientes e micronutrientes foliar

Ao fim do experimento, amostras de folhas foram coletadas ao acaso para avaliação química. Cinco amostras de cada tratamento contendo 15 folhas foram embaladas, etiquetadas e enviadas à empresa química especializada Fullin – Laboratório de Análise Agronômica e Ambiental, para a detecção da concentração interna do ferro, bem como para caracterização de macro e micronutrientes e outros elementos químicos presentes nas amostras. O protocolo seguido pela empresa confiada utilizou os métodos descritos por Malavolta (1997). P, K, S, Ca, Mg, Fe, Zn, Cu, Mn foram extraídos pela digestão nitro-perclórica. P e S foram determinados pela colorimetria (Espectrofotômetro, Modelo AJX 1600, Micronal, Brasil), Ca, Mg, Fe, Zn, Cu e Mn pelo espectro de absorção atômica (Modelo 210 VGP, Buck Scientific, East Norwalk, USA) e o K pelo fotômetro de chama (Model B462, Micronal, São Paulo, Brasil). B foi extraído pela digestão seca-calcinação e determinado pela colorimetria (Espectrofotômetro, Modelo AJX 1600, Micronal, Brasil). O N foi extraído pela digestão ácida a quente e determinado por titulador (Modelo Digitrate, Jencons, Brasil).

5.6 Análise físico-química do solo

Ao final do experimento, cinco amostras do solo de cada tratamento, totalizando 30 amostras, foram coletadas para a caracterização física e química, conforme apresentado nas tabelas 8 e 9 respectivamente (Anexo). A análise química do solo e a granulométrica foram realizadas no laboratório de análise agronômica e ambiental Fullin Linhares-ES de acordo com o método descrito pela Embrapa (1997). Fe, Zn, Cu, Mn, P, K e Na foram extraídos com $\text{HCl } 0,05 \text{ mol L}^{-1} + \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ } 0,0125 \text{ mol L}^{-1}$, enquanto Ca e Mg foram extraídos com $\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$. Fe, Zn, Cu, Mn, Ca e Mg foram determinados pelo espectro de absorção atômica (Modelo 210 VGP, Buck Scientific, East Norwalk, USA), P foi determinado pelo espectro (Modelo B542, Micronal, São Paulo, Brasil), e K e Na foram determinados pelo fotômetro de chama (Modelo B462, Micronal, São Paulo, Brasil). A classificação textural foi determinada em conformidade com os métodos da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. O pH foi determinado usando o pHmetro DM-22 (Digimed, São Paulo, Brasil), enquanto o teor de matéria orgânica foi extraído com oxidação de $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O } 4 \text{ mol L}^{-1} + \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ } 10 \text{ mol L}^{-1}$ e determinado pelo espectro de absorção atômica (Modelo 210 VGP, Buck Scientific, East Norwalk, USA) de acordo com Raij et al. (2001). A acidez potencial (H+Al) foi obtida com solução de acetato de cálcio e titulação alcalimétrica do extrato. O S foi extraído com $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \text{ } 0,01 \text{ mol/L}$ e o B com $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O } 0,125\%$ e ambos determinados pelo

colorimetria (Espectrofotômetro, Modelo AJX 1600, Micronal, Brasil). A saturação de bases foi calculada segundo Abreu et al. (2006).

5.7 Tolerância protoplasmática

Para acessar a estabilidade das membranas celulares (extravasamento de eletrólitos) foi utilizado o método descrito por Bajji et al. (2001). Utilizando-se folhas do 2º ou 3º nó a partir do ápice caulinar, discos foliares de 1cm de diâmetro foram retirados com o auxílio de um furador e lavados por três vezes em água destilada para a retirada do conteúdo das células rompidas durante o corte e de outros eletrólitos aderidos às folhas. Após a lavagem, cinco discos foram colocados em frascos contendo 20 mL de água ultrapura a 5°C durante a noite. Posteriormente a esse período, as amostras foram postas a temperatura ambiente e a condutividade elétrica (C1) foi medida com o auxílio de um condutivímetro portátil (Sanxin, modelo SX723, China). Após esse procedimento, os tubos com os discos foram colocados a 90°C por 2h. Três frascos semelhantes aos das amostras contendo apenas água destilada foram utilizados como branco (B1) antes da fervura e (B2) após a fervura. Após o equilíbrio da temperatura, a condutividade elétrica máxima foi medida (C2) e o extravasamento de eletrólitos calculado através da fórmula: $[(C1-B1) / (C2-B2)] \cdot 100$. Foram feitas dez repetições para esse parâmetro.

5.8 Teores de pigmentos fotossintéticos

A extração dos pigmentos fotossintetizantes foi realizada com base em Wellburn (1994). As mesmas folhas utilizadas para leitura da fluorescência e trocas gasosas foram coletadas para esta análise. Utilizando um furador metálico de 1cm de diâmetro, foram retirados os discos foliares, desprezando-se a nervura central. Um total de dois discos foliares por folha foram transferidos para tubo de ensaio, contendo 10 mL de dimetilsulfóxido (DMSO), e mantidos no escuro a temperatura de 70°C por um período de 3 horas com base em testes feitos anteriormente. As leituras de absorbâncias dos extratos foram feitas em espectrofotômetro (ThermoScientific®, Genesys 10S, EUA), a 470 nm, 646nm e 663 nm. A partir das leituras espectrofotométricas, foram calculados os teores de clorofilas e carotenóides usando as equações de Arnon (1949) e Lichtenthaler (1987), respectivamente:

$$Clor. a = [(12,7.A_{646}) - (2,69.A_{663})].V/(1000.MS)$$

$$Clor. b = [(22,9.A_{663}) - (4,68.A_{646})].V/(1000.MS)$$

$$Clor. total = [(20,2.A646) - (2,69.A663)].V/(1000.MS)$$

$$Carot. = [(1000.A470) - (1,82.Clor.a - 85,02.Clor.b)].V/(198.1000.MS)$$

Onde: $A470$ = absorvância a 470 nm; $A646$ = absorvância a 646 nm; $A663$ = absorvância a 663 nm; V = volume da amostra (mL); MS = massa seca da amostra (g); $Clor.a$ = clorofila a ; $Clor.b$ = clorofila b ; $Carot.$ = carotenóides.

Para a obtenção da massa seca, os discos foliares foram, após a extração dos pigmentos, secos em estufa a 70°C, até obtenção de massa constante. Os valores foram obtidos como total de pigmentos em miligramas por grama de massa seca (mg.g⁻¹MS).

5.9 Cinética de emissão da fluorescência transiente (OJIP)

As medições da fluorescência da clorofila a foram feitas entre 8 e 10 horas da manhã em folhas jovens totalmente expandidas do 2º ou 3º nó a partir do ápice caulinar, ainda ligadas às plantas e adaptadas ao escuro por 30 minutos por intermédio de um clipe. A emissão da fluorescência transiente OJIP (10 µs a 1 s) foi medida com um fluorômetro portátil (Pocket PEA, Hanstech, King's Lynn, Norkfolk, UK), conforme metodologia sugerida por Tsimili-Michael e Strasser (2008). A fluorescência nas folhas foi induzida por pulso saturante de luz vermelha de 3.500 µmol fótons m⁻² s⁻¹ e analisada por meio do teste JIP. As definições e equações do teste JIP utilizadas seguiram a proposta de Strasser et al. (2004), sendo escolhidos os seguintes parâmetros:

- ABS/RC: Fluxo de absorção (de clorofilas da antena) por RC;
- TR₀/RC: Fluxo de energia capturada (levando à redução Q_A) por RC;
- DI₀/RC: Fluxo de dissipação de energia por centro de reação;
- RE₀/RC: Fluxo de elétrons reduzindo aceptores finais de elétrons no lado acceptor do PSI, por RC;
- PI_{TOTAL}: Índice de desempenho (potencial) para conservação de energia a partir de um exciton até a redução do acceptor final do FSI, sendo resultado da multiplicação (RC/ABS). $[\varphi_{Po}/(1 - \varphi_{Po})].[\psi_{Eo}/(1 - \psi_{Eo})].[\delta_{Ro}/(1 - \delta_{Ro})]$.

5.10 Trocas gasosas e assimilação líquida de CO₂

As medições de trocas gasosas foram efetuadas na 2ª ou 3ª folha jovem totalmente expandida a partir do ápice do caule, com um analisador de gases infravermelho portátil (IRGA) LC-PRO (ADC, Hoddesdon, UK), em irradiância de 1044 µmol de fótons m⁻² s⁻¹.

Foram avaliadas as variáveis: assimilação de CO₂ (A , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), transpiração (E , $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), condutância estomática (g_s , $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), concentração intercelular de CO₂ (C_i , $\mu\text{mol mol}^{-1}$) (MACHADO et al., 2005).

5.11 Anatomia foliar, anatomia radicular e testes histoquímicos

Amostras de folhas completamente expandidas localizadas no 2º ou 3º nó a partir do ápice do caule foram fixadas em etanol 70% (JOHANSEN, 1940). Para as análises foliares, foram utilizados segmentos da porção mediana da lâmina foliar, os quais foram seccionados transversalmente com o auxílio de micrótomo de mesa e montados em glicerina. As análises anatômicas quantitativas foram realizadas por meio de medições da espessura da epiderme de ambas as faces da folha, e dos parênquimas paliádico e esponjoso, sendo 30 medições para cada parâmetro analisado. Para a determinação da natureza química da parede celular, cortes do material vegetal fresco de raiz, obtidos também com o uso de micrótomo de mesa, foram submetidos ao teste histoquímico utilizando-se como reagente floroglucinol em meio ácido (SASS, 1951) a fim de evidenciar paredes lignificadas e lugol (JOHANSEN, 1940) para a verificação da ocorrência de amido.

As observações e a documentação fotográfica foram realizadas em fotomicroscópio Nikon Eclipse 50i (Japão) e as análises qualitativas foram feitas utilizando-se software de análise de imagens Nikon NIS-Elements (Japão) e a quantitativa por meio de software – Tsview v.6.1.3.2 (Tucsen Imaging Technology Co. Limited).

5.12 Morfologia

Os sintomas de toxidez nas folhas foram determinados por observações periódicas de necrose nas folhas maduras. Foi observada também a morfologia das raízes ao final do experimento. A documentação foi feita por fotografia.

5.13 Análise estatística

Os dados relativos a todas as avaliações realizadas acima foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. As análises foram executadas pelo programa estatístico Assistat 7.7 beta (2013), UAEG-CTRN-UFCG, Campina Grande – PB.

6. RESULTADOS

6.1 Análises de crescimento

A massa seca das raízes apresentou valores menores sob a maior dose de Fe (Tabela 1).

Tabela 1 – Massa seca (g) das raízes de café Conilon sob a influência da adição de doses de Fe ao solo.

	Fe (mg/L)					
	0	10	40	120	200	400
MSR (g)	1,075 a	0,994 ab	0,861 ab	0,944 ab	0,805ab	0,699 b

Médias seguidas de letras distintas na mesma linha diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível 5% de probabilidade (n=10). MSR: Massa seca de raiz.

6.2 Análise de macronutrientes e micronutrientes foliar

Os teores de macro e micronutrientes foliares encontram-se na tabela 2. Os teores de P não diferiram e foram menores nas doses de 120, 200 e 400 mg/L de Fe quando comparados ao controle. As concentrações de K foram maiores nas doses igual e acima de 10 mg/L de Fe. Maior teor de Fe foliar foi encontrado nas plantas submetidas a 400 mg/L de Fe. O maior teor de B ocorreu nos indivíduos sob a dose de 400 mg/L quando comparado às doses de 40 mg/L e 200 mg/L. As maiores concentrações de Zn foliar foram encontradas nas plantas submetidas a 120, 200 e 400 mg/L de Fe em relação ao controle e à dose de 10 mg/L de Fe. Para os demais elementos não houve diferença significativa entre os tratamentos.

Tabela 2 – Teores de macronutrientes e micronutrientes das folhas de café Conilon sob diferentes doses de Fe no solo.

Nutrientes	Fe (mg/L)					
	0	10	40	120	200	400
Macronutrientes (g/Kg)						
Nitrogênio	31,90 ns	30,53	32,51	31,43	30,84	32,40
Fósforo	2,11 a	1,67 ab	1,65 ab	1,61 b	1,46 b	1,57 b
Potássio	23,00 b	31,13 a	32,87 a	30,38 a	31,50 a	30,13 a
Enxofre	1,81 ns	2,02	2,42	2,24	2,13	1,74
Cálcio	9,00 ns	11,24	12,62	9,87	8,10	11,70
Magnésio	3,26 ns	3,56	3,66	3,26	3,11	4,04
Micronutrientes (mg/kg)						
Ferro	214,25 b	228,33 b	182,50 b	157,66 b	215,89 b	311,00 a
Zinco	24,00 c	22,20 c	24,66 bc	31,00 a	28,50 ab	28,50 ab
Cobre	8,80 ns	10,80	12,00	10,80	12,20	11,80
Manganês	62,40 ns	76,80	72,60	75,00	55,60	84,60
Boro	40,00 ab	39,80 ab	33,80 b	42,00 ab	37,40 b	53,40 a

Médias obtidas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade (n=5). ns = não significativo.

6.3 Tolerância protoplasmática

O extravasamento de eletrólitos foi maior nas plantas sob 400 mg/L de Fe em relação à dose de 40 mg/L, porém não diferiu das demais doses (Tabela 3).

Tabela 3 – Extravasamento de eletrólitos em folhas de café Conilon em função de doses de Fe aplicadas ao solo.

	Fe (mg/L)					
	0	10	40	120	200	400
EE (%)	9,237 ab	9,162 ab	7,620 b	7,882 ab	8,595 ab	10,028 a

Médias seguidas de letras distintas na mesma linha diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade (n=10). EE: Extravasamento de eletrólito.

6.4 Teores de pigmentos fotossintéticos

Os teores de pigmentos fotossintéticos nas plantas de café não sofreram alteração com a aplicação das diferentes doses de Fe (Tabela 4).

Tabela 4 – Teores de pigmentos fotossintéticos nas folhas de café Conilon em função de doses de Fe fornecidas ao solo.

Pigmentos	Fe (mg/L)					
	0	10	40	120	200	400
Clorofila <i>a</i>	12,21 ns	12,65	12,82	12,04	12,62	11,61
Clorofila <i>b</i>	3,09 ns	3,25	3,42	3,06	3,17	3,05
Clorofila total	19,98 ns	20,69	21,11	19,69	20,64	19,00
Clorofila <i>a/b</i>	3,93 ns	3,92	3,78	3,90	4,02	3,80
Carotenóides	5,34 ns	5,51	5,62	5,09	5,39	5,14

Médias não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade (n=10).
ns – não significativo.

6.5 Fotoquímica e trocas gasosas

As variáveis fotoquímicas obtidas pela análise de fluorescência da clorofila *a* não apresentaram diferenças significativas (Tabela 5).

Tabela 5 – Parâmetros fotoquímicos da análise da fluorescência transiente da clorofila *a* pelo teste JIP em folhas de café Conilon submetidas a doses de Fe aplicadas ao solo.

Parâmetros	Fe (mg/L)					
	0	10	40	120	200	400
ABS/RC	2,11 ns	2,05	2,03	2,1	2,03	2,02
TR ₀ /RC	1,67 ns	1,64	1,63	1,68	1,62	1,61
DI ₀ /RC	0,44 ns	0,41	0,4	0,42	0,41	0,4
RE ₀ /RC	0,30 ns	0,32	0,33	0,34	0,3	0,3
PI _{TOTAL}	1,13 ns	1,35	1,48	1,36	1,22	1,2

ABS/RC: Fluxo de absorção (de clorofilas da antena) por RC; TR₀/RC: Fluxo de energia capturada (levando à redução Q_A) por RC; DI₀/RC: Fluxo de dissipação de energia por centro de reação; RE₀/RC: Fluxo de elétrons reduzindo aceptores finais de elétrons no lado aceptor do PSI, por RC.; PI_{TOTAL}: Índice de desempenho (potencial) para conservação de energia a partir de um exciton até a redução do aceptor final do FSI. Médias seguidas de de letras distintas na mesma linha diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade (n=10).

As plantas submetidas ao controle mostraram maiores taxas de fotossíntese, condutância estomática e transpiração, sendo as menores taxas encontradas no tratamento 200 mg/L Fe. A concentração de carbono interno foi maior nas plantas sob a concentração de 400 mg/L de Fe (Tabela 6).

Tabela 6 – Parâmetros de trocas gasosas em folhas de café Conilon sob influência de doses de Fe aplicadas ao solo.

Medidas	Fe (mg/L)					
	0	10	40	120	200	400
<i>A</i> ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	5,807 a	4,196 bc	4,769 ab	3,872 bc	3,178 c	4,449 b
<i>g_s</i> ($\text{mol H}_2\text{O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	0,093 a	0,048 bc	0,060 b	0,056 bc	0,038 c	0,066 b
<i>E</i> ($\text{mol H}_2\text{O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	1,912 a	1,228 bc	1,336 b	1,138 bc	0,999 c	1,251 bc
<i>C_i</i> ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol ar}^{-1}$)	220,385 bc	197,265 d	215,281 bc	232,621 ab	207,382 cd	249,415 a

Médias seguidas de letras distintas na mesma linha diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade (n=10). *A*: fotossíntese; *g_s*: condutância estomática; *E*: transpiração; *C_i*: concentração interna de CO₂.

6.6 Anatomia foliar e testes histoquímicos

Os valores de espessura total do limbo, da face adaxial da epiderme e do parênquima esponjoso não diferiram significativamente entre os tratamentos. A espessura do parênquima paliçádico foi menor na dose de 400 mg/L em relação às doses de 120 e de 200 mg/L. A espessura da face abaxial da epiderme foi maior no controle quando comparada com a dose de 40 mg/L (Tabela 7).

Tabela 7 – Medidas anatômicas foliares de café Conilon submetidas a doses de Fe adicionadas ao solo.

Medidas	Fe (mg/L)					
	0	10	40	120	200	400
Espessura total do limbo (μm)	244,8 ns	246,7	236,3	240,4	247,2	237,6
Epiderme face adaxial (μm)	27,5 ns	28,9	28,3	29,6	28,9	28,9
Parênquima paliçádico (μm)	45,5 abc	46,2 abc	45,3 bc	47,0 ab	49,6 a	42,4 c
Parênquima esponjoso (μm)	150,9 ns	151,6	143,4	144,2	146,6	144,1
Epiderme face abaxial (μm)	20,2 a	19,1 ab	18,7 b	19,2 ab	19,2 ab	20,0 ab

Médias seguidas de letras distintas na mesma linha diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade (n=5). ns – não significativo.

As raízes sob o maior teor de Fe apresentaram maior lignificação da epiderme e do córtex evidenciada pelo teste histoquímico com floroglucinol. Algumas células corticais também apresentaram alteração do formato, com retração do protoplasto (Figura 1).



Figura 1. (A) Secções transversais de raízes de café Conilon sob 0 mg/L de Fe e (B) sob 400mg/L de Fe. Legenda: (→) células corticais alteradas, (*) lignificação da epiderme e (▲) lignificação do córtex submetido ao reagente floroglucinol. Barra: 100 µm.

6.7 Morfologia

No tratamento com maior teor de Fe verificou-se alteração na morfologia das raízes, como redução no crescimento e na emissão de raízes laterais (Figura 2).

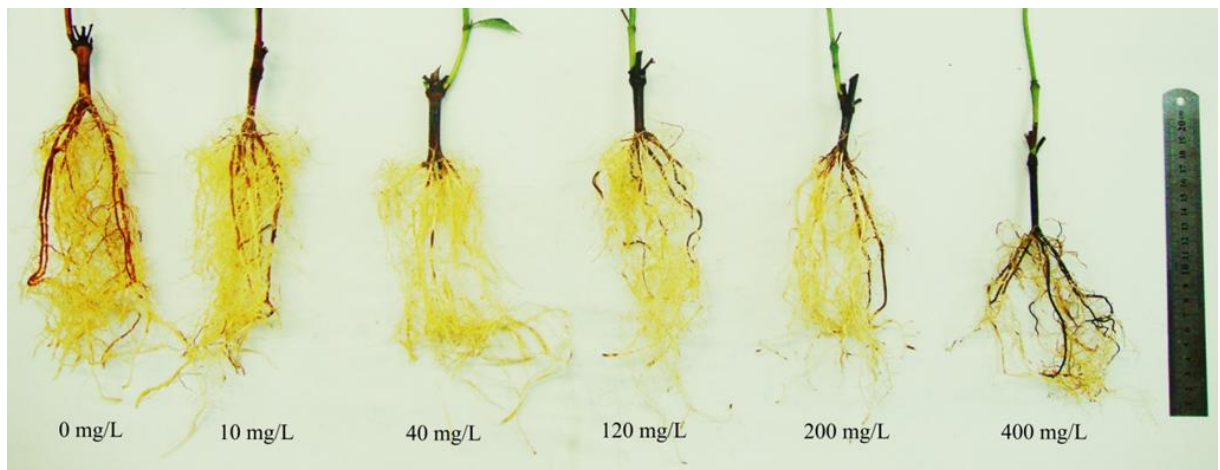


Figura 2. Raízes de café Conilon submetidas a 0; 10; 40; 120; 200 e 400 mg/L de Fe.

Foi observada também necrose em folhas maduras como consequência da dose maior de Fe aplicado (Figura. 3).

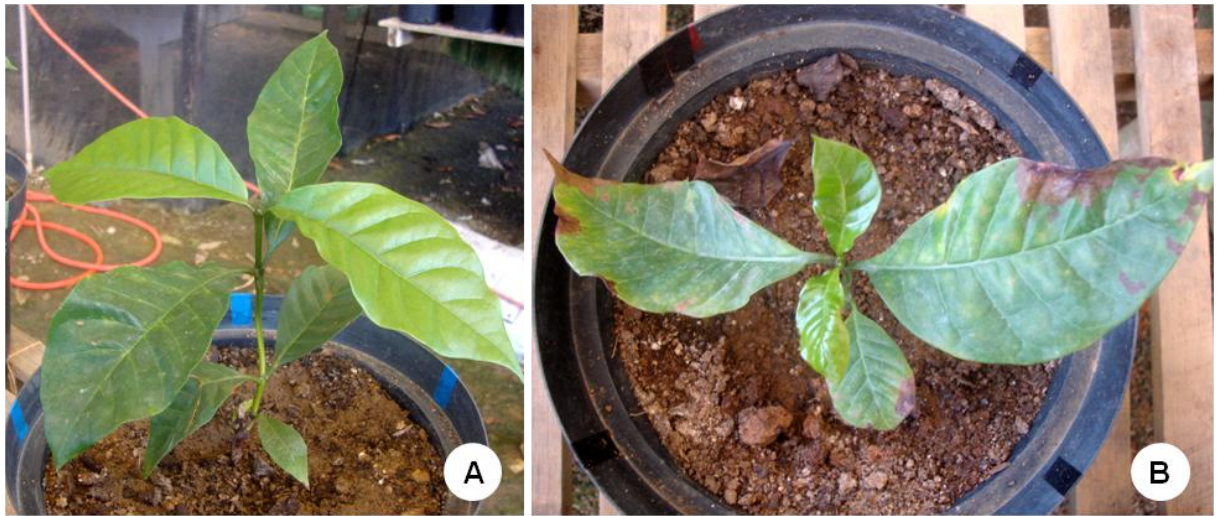


Figura 3. (A) Planta saudável. (B) Planta com necrose em folha madura sob o tratamento com 400mg/L de Fe.

7. DISCUSSÃO

7.1 Análises de crescimento

Os resultados obtidos no presente trabalho demonstraram que o crescimento de raízes de café Conilon submetidas a altas concentrações de Fe é afetado, com a redução da massa seca bem como pela redução no crescimento e na emissão de raízes laterais (Figura 2). Tais resultados corroboram os obtidos por diversos autores, como por exemplo, Sahrawat (2005), que observou raízes escassas em plantas de arroz devido à toxicidade causada por Fe, e Adamski (2011), que demonstrou a redução da massa seca das raízes de batata-doce submetidas às maiores concentrações de ferro. Segundo Becker e Asch (2005) e Dorlodot et al. (2005), plantas sob excesso de Fe apresentam raízes com crescimento atrofiado e, conseqüentemente, produção limitada. Além disso, Abu et. al. (1989) afirma que a redução do acúmulo de matéria seca é associada à toxicidade durante os estádios vegetativos. Esses resultados podem estar relacionados com o comprometimento do metabolismo das células da raiz. Conforme Chatterjee et al. (2006), a inibição do crescimento ocorre devido ao aumento na produção de ERO's provocado pelo excesso de Fe, o que por sua vez compromete o metabolismo da planta.

7.2 Análises de macronutrientes e micronutrientes

Para o cafeeiro, a concentração de Fe nas folhas apresenta a seguinte classificação: nível crítico (131 mg/Kg) (COSTA e BRAGANÇA, 1996), deficiente a sub normal (40 mg/Kg), sub normal a normal (70 mg/Kg) e normal a excesso (200 mg/Kg) (WILSON, 1985). Contudo, o valor considerado crítico depende da espécie, do estado fisiológico e das condições de crescimento. Nesse estudo, as folhas sob a dose mais elevada de Fe apresentaram 311 mg/Kg de massa seca foliar, concentração essa considerada bem superior a excessiva de acordo com Wilson (1985).

O excesso de Fe pode influenciar na absorção de outros nutrientes e causar desordem nutricional (SNOWDEN e WHEELER, 1995). No presente trabalho, os teores menores de P foram observados nas maiores doses de Fe quando comparados ao controle, apoiando os dados obtidos por Silveira et al. (2007) e Adamski et al. (2012) para culturas de arroz sensíveis ao excesso de Fe. Howeler (1973) sugere que doses elevadas de Fe podem provocar uma limitação na translocação do P do apoplasto para o simplasto. Além disso, o P e alguns outros nutrientes são co-regulados pelo Fe (ZHENG et al. 2009).

O teor de B maior nas folhas sob 400 mg/L de Fe quando comparado às doses de 40 mg/L e 200 mg/L pode estar associado à maior lignificação das células externas ao córtex da raiz, conferindo uma barreira a entrada de metais em excesso, já que o B está envolvido na biossíntese de lignina, pectina e celulose apresentando um papel no controle da permeabilidade da membrana (POLLARD et al., 1977). Trabalhos acerca de plantas com deficiência de B mostraram deslignificação das paredes das células do esclerênquima (MARSCHNER, 1995).

Apesar de muitos autores, como Ottow et al. (1982), Fageria (1988), Sajwan e Lindsay (1988) e Jugsujinda e Patrick (1993) afirmarem que com o excesso de Fe as concentrações de Zn e de K diminuem, no presente estudo isso não foi observado. Os resultados obtidos para o Zn apoiam os obtidos por Yoshihara et al. (2010), que obtiveram aumento na concentração de Zn nos brotos de arroz *indica* em teores elevados de ferro. De acordo com Grotz e Guerinot (2006), o íon Fe^{2+} é transportado para o interior do vegetal por transportadores capazes também de transportar outros minerais, como o Zn, resultando em um acúmulo maior desses nutrientes com o aumento do Fe no solo. Além disso, a acidificação do meio provocada pela raiz pode ter disponibilizado o Zn, possibilitando maior absorção de Zn^{2+} (KOBAYASHI e NISHI, 2008).

7.3 Tolerância protoplasmática

Danos em membranas plasmáticas a nível foliar podem ser um dos primeiros sinais de estresse. Bajji et al. (2001) atribuíram como um dos principais causadores desse dano o estado nutricional da planta. No presente estudo, o maior extravasamento de eletrólitos foi observado para as plantas sob a dose mais elevada de Fe aplicada em relação à dose de 40 mg/L, o que apoia os resultados encontrados por Araújo (2012), que verificou uma degradação das membranas celulares devido ao estresse oxidativo nas folhas *Paspalum urvillei* submetidas ao excesso de ferro. Segundo Souza-Santos et al. (2001), Becana et al. (1998), Tsai e Huang (2006) e Stein (2009), o teor elevado de ferro pode provocar um estresse oxidativo por estimular a formação de ERO's, que por suas vezes induzem vários distúrbios fisiológicos, como alteração da estrutura e da permeabilidade das membranas, além de danos aos tecidos vegetais.

7.4 Teores de pigmentos fotossintéticos

O Fe que entra na célula deve ser compartimentalizado para as futuras utilizações no funcionamento celular e para impedir que se acumule em excesso, o que poderia levar à

toxicidade. O cloroplasto armazena a maior quantidade de Fe nas células dos vegetais, acumulando cerca de 80% a 90% do Fe celular (MARSCHNER, 1995).

As moléculas de clorofila são suscetíveis a ERO's e podem ser afetadas como consequência do estresse oxidativo induzido por ferro (SPILLER e TERRY, 1980; TAYLOR et al., 1982; VANSUYT et al. 1997). Além disso, danos às membranas dos cloroplastos causados também por ERO's podem propiciar perda de pigmentos fotossintéticos.

Embora estudos relatem que os metais podem modificar os processos funcionais das plantas causando, dentre outros efeitos, a degradação da clorofila (DING et al., 2007) como observado por Chatterjee et al. (2006), em batata-doce submetida ao excesso de Fe, no presente trabalho não foram observadas diferenças significativas para os teores de pigmentos entre os tratamentos. Os resultados do presente estudo corroboram os de Shainberg et al. (2000), que também não obtiveram diferenças para esses parâmetros entre os indivíduos de *Phaseolus vulgaris* (cv. Pinto) tratados com excesso de ferro.

7.5 Cinética de emissão da fluorescência transiente e trocas gasosas

Embora a fluorescência da clorofila *a* seja um parâmetro fisiológico sensível aos efeitos foto-oxidativos do excesso de Fe, o que pode desencadear danos aos aparatos fotossintéticos (LUPINKOVÁ e KOMENDA, 2004; SINHA e SANXENA, 2006; NENOVA, 2009), no presente estudo, a fluorescência da clorofila *a* não foi influenciada pelas doses de ferro.

Já o aumento da dose de Fe na solução do solo causou mudanças significativas às variáveis de trocas gasosas avaliadas. As plantas sob a dose de 200mg/L de Fe apresentaram uma redução na taxa fotossintética líquida.

A queda na fotossíntese líquida pode ser atribuída a uma limitação estomática menor na dose de 200mg/L de Fe, como também avaliado pelos valores inferiores de *g_s*. As menores condutâncias estomáticas com o aumento da concentração de Fe também levaram a uma redução na taxa de transpiração, o que pode ser esperado como um mecanismo de fuga para reduzir a absorção de Fe em excesso, já que esse é transportado pelo xilema (CURIE e BRIAT, 2003).

7.6 Anatomia foliar e radicular

A espessura do parênquima paliçádico foi menor na dose de 400 mg/L em relação às doses de 120 e de 200 mg/L. Muller (2011), ao pesquisar a toxidez de ferro em arroz,

identificou injúrias nas células da epiderme e do parênquima clorofiliano, o que causou uma redução na espessura do mesofio.

Do mesmo modo, as raízes sob o maior teor de Fe apresentaram algumas células do córtex com alteração do formato e retração do protoplasto (Figura 1), assim como evidenciado pelo trabalho de Silva (2009) para espécies de restinga sob excesso de Fe.

Tais alterações anatômicas encontradas tanto nas folhas como nas raízes da espécie desse estudo podem estar ligadas ao estresse oxidativo causado por ERO's (BODE et al., 1995a; 1995b), que podem provocar alterações na membrana plasmática e rupturas de células (TAYLOR et al. 1984).

A maior lignificação das paredes secundárias das células da epiderme e do córtex da raiz submetida ao excesso de Fe observada no atual trabalho (Figura 1) pode conferir uma barreira física na raiz (VISSER et al., de 2000, SEAGO et al. 2005, ARMSTRONG e ARMSTRONG, 2005; INSALUD et al., 2006 e SOUKUP et al., 2007). Esse dado concorda com os resultados encontrados por Deng et. al. (2009), que observaram a deposição de lignina na raiz de plantas do Pantanal, o que, dentre outros fatores, contribuiu para diminuir a permeabilidade da raiz, ajudando a evitar a absorção em excesso do metal.

7.7 Morfologia foliar

Necroses em folhas maduras, como verificadas no café Conilon (Figura 3), foram relatadas anteriormente como sintoma associado à toxicidade por Fe (BRIAT, 2002; XING et al.; 2010, MULLER, 2011; ADAMSKI et al., 2012; PEREIRA et al., 2013). Estes sintomas são considerados um indicativo de estresse oxidativo (BODE et al., 1995a; 1995b), que podem acarretar injúrias nas células das folhas levando à necrose.

8. CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo indicam que *C. canephora* cv. Conilon se apresenta sensível à dose de 400 mg/L de ferro, a qual foi nociva ao promover reduções significativas no crescimento de raízes, maior dano à membrana plasmática, alteração na anatomia foliar e radicular e necrose nas folhas maduras. Em relação às doses intermediárias, pode-se concluir que apesar de propiciaram valores diferentes em alguns dos parâmetros analisados em relação ao controle de um modo geral, não significa que as plantas não estejam se desenvolvendo bem. O agricultor deve estar atento, portanto, à concentração de ferro nas águas de irrigação, pois doses desse metal nas águas que excedam o recomendado podem causar sintomas de toxidez e diminuição da produtividade da plantação. Neste caso, concentração de 400mg/L resultante do acúmulo progressivo de ferro no solo advindo da irrigação pode provocar fitotoxidez.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, M.F.; ANDRADE, J.C.; FALCÃO, A.A. Protocolos de análises químicas. In: ANDRADE, J.C.; ABREU, M.F. (Eds.). *Análise Química de Resíduos Sólidos para Monitoramento e Estudos Agroambientais*. Campinas, SP: IAC, 2006. P. 121-1581.
- ABU, M. B.; TUCKER, E. S.; HARDING, S. S.; SESAY, J. S. Cultural practices to reduce iron toxicity in rice. *International rice research newsletter*, v.14, p.19. 1989.
- ADAMSKI, J.M. Respostas morfofisiológicas de *Ipomoea batatas* L. em função da concentração de ferro. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Pelotas. 2011.
- ADAMSKI, J.M.; DANIELOSKI, R.; DEUNER, S.; BRAGA, E.J.B.; CASTRO L.A.S.; PETERS, J.A. Responses to excess iron in sweet potato: impacts on growth, enzyme activities, mineral concentrations, and anatomy. *Acta Physiologiae Plantarum*. 2012.
- AIROLDI, R.P. S. Eficiência dos meios filtrantes disco e manta sintética não tecida em fertirrigação por gotejamento. Dissertação de mestrado em Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas. 2003.
- ALMEIDA, O.A. Qualidade da água de irrigação. Empresa Brasileira e Pesquisa Agropecuária (Embrapa). 1ª Ed. Cruz de Almas – BA. 2010.
- ALVES, D.N.B. Remoção de ferro em água de irrigação através de filtragem em areia e zeólita. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Lavras. 2008.
- AMORIM, J.R.A. Qualidade da água subterrânea e riscos para irrigação. 2013. Disponível em <<http://www.embrapa.br/imprensa/artigos/2009/qualidade-da-agua-subterranea-e-riscos-para-irrigacao>> Acessado em: out. 2013.
- ANUÁRIO ESTATÍSTICO DO CAFÉ (2002/2003), Coffee Business, Rio de Janeiro, 101p.
- ARAÚJO, T.O. Efeitos do ferro em *Setaria parviflora* (POIR.) kerguelen e *Paspalum urvillei* Steudel (Poaceae). Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Viçosa. 2012.
- ARMSTRONG, J.; ARMSTRONG, W. Rice: sulfide-induce d barriers to root radial oxygen loss, Fe²⁺ and water uptake, and lateral root emergence. *Annals of Botany*, v. 96, p.625–638. 2005.
- ARNON, D. I. Copper enzimas in isolated cloroplasts Polyphenoloxidase in Beta vulgaris. *Plant Physiology*. v.24, n.1, p. 1-15.1949.
- ASSISTAT 7.7 BETA (2013), UAEG-CTRN-UFCG, Campina Grande – PB.
- AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. Water quality for agriculture. Rome: FAO, 1976. P.97. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 29).
- AYERS, R. S.; WESTCOT, D.W. A qualidade da água na agricultura. Campina Grande: UFPB, p. 218, 1991.

BAJJI, M.; KINET, J-M.; LUTTS, S. The use of the electrolyte leakage method for assessing cell emembrane stability as a water stress tolerance test in durum wheat. *Plant Growth Regulation*, p. 1-10, 2001.

BAUER,P.; HELL, R. 2006. Translocation of Iron in Plant Tissues. In: BARTON, L.L.; ABADIA, J. (Eds.). *Iron Nutrition in Plants and Rhizospheric Microorganisms*. Springer, Dordrecht, p.279-288. 2006.

BECANA, M.; MORAN, J.F.; ORMAETXE, I.I. Iron-dependent oxygen free radical generation in plants subjected to environmental stress: toxicity and antioxidant protection. *Plant and Soil*, v. 201, p.137-147. 1998.

BECKER, M.; ASCH, F. Iron toxicity in rice-condition and management concepts. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, v.168, p. 558–573, 2005.

BELING, R.R. (Ed.). *Anuário brasileiro do café 2005*. Santa Cruz do Sul: Gazeta Santa Cruz, 2005. p.136.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C.; *Manual de irrigação*. Viçosa: Ed. UFV. 7º ed. p. 611. 2005.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. *Manual de Irrigação*. 8º ed. Viçosa: UFV, p.625. 2006.

BERTHAUD, J. L’Incompatibilité chez *Coffea canephora*: Méthode de test et déterminisme génétique. *Cofé Cacao Thé*. Nogest-sur-Marne, v. 24, n.1, p. 167-174. 1980.

BODE, K.; DÖRING, O.; LÜTHJE, S.; BÖTTGER, M. Induction of iron toxicity symptoms in rice (*Oryza sativa* L.). *Mitteilungen aus Institut für allgemeine Botanik in Hamburg*, v.25, p.35-43. 1995a.

BODE, K.; DÖRING, O.; LÜTHJE, S.; NEUE, H.-U; BÖTTGER, M. The role of active oxygen in iron tolerance of rice (*Oryza sativa* L.). *Protoplasma*, v.184, p.249-255.1995b.

BRAY, E.A., BAILEY-SERRES, J., WERETILNYK, E. Responses to abiotic stresses. In: BUCHANAN, B.; GRUISSEM, W.; JONES, R. (Eds.), *Biochemistry e Molecular Biology of Plants*. American Society of Plant Physiologists, Rockville, p. 1158–1203. 2000.

BRIAT, J. F. Metal-ion-mediated oxidative stress and its control. In *Oxidative Stress in Plants*. Eds. M Montagu and D Inze p. 171–189. Taylor and Frances Publisher, London. 2002.

BRIAT, J-F.; CURIE, C. GAUMARD, F. Iron utilization and metabolism in plants. *Current Opinion in Plant Biology*, v.10, p.276-282. 2007.

BRIAT, J-F.; DUC, C.; RAVET, K.; GAYMARD,F. Ferritins and iron storage in plants. *Biochimica et Biophysica Acta*, v.1800, p.806-814. 2010.

BRIAT, J-F.; FOBIS-LOISY, I.; GRIGNON, N.; LOBREAUX, S.; PASCALL, N.; SAVINO, G.; THOIRON, S.; VON WIREN, N.; WUYTSWINKEL, O. Cellular and molecular aspects of iron metabolism in plants. *Biology of the Cell*, v.84, p.69-81.1995.

BRIAT, J-F.; LOBRÉAUX, S. Iron transport and storage in plants. *Trends in Plant Science*, v.2, p. 187-193. 1997.

BRIDSON, D.M. Additional notes on *Coffea* (Rubiaceae) from Tropical East Africa. *Kew Bulletin*, v. 49, p. 331-342, 1994.

CHARRIER, A.; BERTHAUD, J. Botanical classification of coffee. In: Clifford, M.N.; Willson, K.C. (Eds.) *Coffea: Botany, biochemistry and production of beans and beverage*. London, Croom Herm, Westport, Conn, p. 12-47. 1985.

CHATTERJEE, C., GOPAL R., DUBE, B.K. Impact of iron stress on biomass, yield, metabolism and quality of potato (*Solanum tuberosum* L.). *Sci Horticulturae*, v. 108, p.1–6. 2006.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Cafés do Brasil: safra 2006/2007. Brasília. MAPA/CONAB, dez. 2006.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da Safra Brasileira de Café, Primeiro Levantamento, Brasília, p. 1-20, jan. 2014.

CONNOLLY, E.L. e GUERINOT, M.L. Iron stress in plants. *Genome Biology*, v.3, p.1024.1 – 1024.4. 2002.

COSTA, A.N.; BRAGANÇA, S.M. Normas de referência para o uso do DRIS na avaliação do Estado Nutricional do café Conilon. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 22. Águas de Lindóia-SP, 1996. Anais... Rio de Janeiro, IBC/GERCA, 1996. p.103-104.

CURIE, C.; BRIAT, J.F. Iron transport and signaling in plants. *Annual Review of Plant Biology*, v. 54, p. 183. 2003.

DADALTO, G.G.; BARBOSA, C.A. Zoneamento agroecológico para a cultura do café no estado do Espírito Santo. Vitória, ES: SEAG, p. 28. 1997.

DA COSTA, C.C. Estudos da susceptibilidade de tubos gotejadores ao entupimento por precipitados químicos de ferro. Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Lavras. 2000.

DAMATTA, F.M.; RONCHI, C.P., MAESTRI, M., BARROS, R.S. Coffee: environment and crop physiology. In: DAMATTA, F.M. (Ed.), *Ecophysiology of Tropical Tree Crops*. Nova Science Publishers, New York, p. 181–216. 2010.

DENG, H.; YE, Z.H.; WONG, M.H. Lead, zinc and iron (Fe^{2+}) tolerances in wetland plants and relation to root anatomy and spatial pattern of ROL. *Environmental and Experimental Botany*, v.65, p.353–362. 2009.

DING, B., SHI, G., XU, Y., HU, J., XU, Q. Physiological responses of *Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb leaves to cadmium stress. *Environmental Pollution*, v.147, p.800-803. 2007.

DORLODOT, S., LUTTS, S., BERTIN P. Effects of ferrous iron toxicity on the growth and mineral composition of an interspecific rice. *Journal of Plant Nutrition* v.28, p. 1–20. 2005.

ECCARDI, F.; SANDALJ, V. *Coffea* – a celebration of diversity. Sandalj Eccardi Company, Trieste, Italy, p. 228. 2002.

EDGE, R.; MCGARVEY, D.J.; TRUSCOTT, T.G. The carotenoids as anti-oxidants – a review. *Journal of Photochemistry and Photobiology*, v.41, p.189-200.1997.

EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa de Solo. 1997.

ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. Water-supply systens, water sources. U.S.A.: Macropaedia, v. 19, p. 649. 1974.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. Nutrição Mineral de Plantas: Princípios e Perspectivas. Trad. Maria Edna Tenório Nunes – Londrina: Editora Planta. 2ª Ed. 2006.

FANG, W.; WANG,J.; LIN, C.; KAO, C. Iron induction of lipid peroxidation and effects on antioxidative enzyme activities in rice leaves. *Plant Growth Regulation*, v.35, p.75-80. 2001.

FAGERIA, N. K. Influence of iron on nutrient uptake by rice. *International rice research newsletter*, v.13, p.20–21.1988.

FASSIO LH.; SILVA, A.E.S. Importância econômica social e econômica do café conilon. In: FERRÃO RG, FONSECA, A.F.A; BRAGANÇA, S.M.; FERRÃO, M.A.G.; MUNER, L.H. (Eds.), *Café Conilon*, Seag/Incaper, Vitória, p. 37-49. 2007.

FAZUOLI, L. C. Genética e melhoramento do cafeeiro. In: RENA, A.B; MALAVOLTA, E.; ROCHA, M.; YAMADA, T. (Eds.), *Cultura do cafeeiro – fatores que afetam a produtividade*. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, Piracicaba, p.87-113, 1986.

FERRÃO, R.G. Biometria aplicada ao melhoramento genético do café Conilon. Tese de Doutorado em Genética e melhoramento – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2004.

FERRÃO, R.G. Relatório de previsão de safra cafeeira no estado do Espírito Santo. Vitória, Incaper, dez. 2006. P.6.

FERRÃO M.A.G.; FERRÃO R.G.; FONSECA, A.F.A.; FILHO, A.C.V.; VOLPI, P.S. Importância econômica social e econômica do café conilon. In: FERRÃO R.G., FONSECA A.F.A., BRAGANÇA S.M., FERRÃO M.A.G., MUNER L.H. (Eds.), *Café Conilon*, Seag/Incaper, Vitória, p. 67-91. 2007a.

FERRÃO, R.G.; FONSECA, A.F.A.; FERRÃO, M. A. G.; MUNER, L. H.; VERDIN FILHO, A. C.; VOLPI, P. S.; MARQUES, E.M.G.; ZUCATELI, F. Café conilon: técnicas de produção com variedades melhoradas. Incaper.circular técnica, 03-I. Vitória: Incaper, p.60. 2007b.

FERRÃO, R.G.; FONSECA, A.F.A.; FERRÃO, M.A.G.; BRAGANÇA, S.M.; FILHO, A.C.V.; VOLPI, P.S. Cultivares de café Conilon. In: In: FERRÃO, R.G.; FONSECA, A.F.A.; BRAGANÇA, S.M.; FERRÃO, M.A.G.; MUNER, L.H. (Eds.), Café Conilon, Seag/Incaper, Vitória, p. 205-225. 2007c.

FERREIRA, A.; CECON, P.R.; CRUZ, C.D.; FERRÃO, R.G.; SILVA, M.F.; FONSECA, A.F.A.; FERRÃO, M.A.G. Seleção simultânea de *Coffea canephora* por meio da combinação de análise de fatores e índices de seleção. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.40, p.1189-1195, 2005.

GHALY, A.E.; SNOW, A.; KAMAL, M.; MONFARED, S.H. American Journal of Iron Uptake and translocation by Facultative and Obligate Wetland Plants. Environmental Sciences v.4, p. 608 – 619. 2008.

GRIEVE, C.M.; POSS, J.A.; AMRHEIN, C. Response of *Matthiola incana* to irrigation with salinity wastewaters. Hortscience, v.41, p. 119–123. 2006.

GROTZ, K.; GUERINOT, M.L. Molecular aspects of Cu, Fe and Zn homeostasis in plants. Biochimica et Biophysica Acta, v. 1763, p. 595-608. 2006.

GURZAU, E.S.; NEAGU, C.; GURZAU, A.E. Essential metals — case study on iron. Ecotoxicology and Environmental Safety, v.56, p. 190 –200. 2003.

HOWELER, RH. Iron-induced orange disease of rice in relation to physicochemical changes in a flooded oxisol. Soil Science Society of America, v.37, p. 898-903.1973.

IBGE. Levantamento sistemático da produção agrícola: pesquisa mensal de previsão e acompanhamento da safra agrícola do Espírito Santo no ano civil. Vitória, ES: IBGE/GCEA, dez. 1995, 2000 e 2005.

INSALUD, N.; BELL, R.W.; COLMER, T.D.; RERKASEM, B. Morphological and physiological responses of rice (*Oryza sativa*) to limited phosphorus supply in aerated and stagnant solution culture. Annals of Botany, v.98, p.995–1004. 2006.

JOHANSEN, D. Plant microtechnique. McGraw-Hill, New York. 1940.

JUGSUJINDA, A.; PATRICK JR., W. H. Evaluation of toxic conditions associated with orange symptoms of rice in a flooded Oxisol in Sumatra, Indonesia. Plant Soil v.152, p. 237–243. 1993.

KARAIVAZOGLOU, N.A.; PAPAKOSTA, D.K.; DIVANIDIS, S. Effect of chloride in irrigation water and form of nitrogen fertilizer on Virginia (flue-cured) tobacco. Field Crops Research, v.92, p.61–74. 2005.

KERBAUY, G. B. Fisiologia Vegetal. Guanabara Koogan. 2ª ed. 2004.

KIM, S.A.; GUERINOT, L. Mining iron: Iron uptake and transport in plants. *FEBS Letters* 581, p. 2273–2280. 2007.

KOBAYASHI, T.; NISH, N.K. Regulation of iron and zinc uptake and translocation in rice. Section IV.3. In:HIRANO, H,-Y.; HIRAI, A.; SANO, Y.; SASAKI, T. (Eds.) *Rice Niology in the Genomics Era. Biotechnology in Agriculture and Forestry* 62. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. p.321-335. 2008.

KRINSKY, N.I.; YEUM, K.-J. Carotenoid-radical interactions. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, v.305, p. 754-760. 2003.

KUKI, K. N.; OLIVA, M. A.; PEREIRA, E. G.; COSTA, A. C.; CAMBRAIA, J. Effects of simulated deposition of acid mist and iron ore particulate matter on photosynthesis and the generation of oxidative stress in *Schinus terebinthifolius* Radii and *Sophora tomentosa* L. *Science of the Total Environment*, v.403, p.207-214, 2008.

LICHTENTHALER H.K. Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, v.148, p. 350-382, 1987.

LIMA, M.M. Desempenho de diferentes tipos de mantas sintéticas não tecidas na filtragem da água para irrigação localizada. Dissertação de Mestrado em Engenharia agrícola – Universidade Estadual de Campinas. 1999.

LIMA, V. L. A.; CHAVES, L. H. G. Qualidade da água. Campina Grande: Agenda. 120 p. 2008.

LUPÍNKOVÁ, L.; KOMENDA, J. Oxidative modifications of the photosystem II D1 protein by reactive oxygen species: from isolated protein to cyanobacterial cells. *Photochemistry and Photobiology*, v.79, p. 152-162. 2004.

MACHADO, E. C.; SCHMIDT, P. T., MEDINA, C. L.. Photosynthetic responses of three citrus species to environmental factors. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 40, p. 1161-1170, 2005.

MAJERUS, V.; BERTIN, P.; LUTTS, S. Absciscic acid and oxidative stress implications in overall ferritin synthesis by African rice (*Oryza glaberrima* Staud.) seedlings exposed to short term iron toxicity. *Plant Soil*, v. 324, p.253-265. 2009.

MARSCHNER, H. Mineral Nutrition of Higher plants. Academic Press, New York. 1999.

MALAVOLTA, E, VITTI, C. C., OLIVEIRA, S.A. Avaliação do estado nutritivo das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba-SP, 2 ed, p. 319. 1997.

MARSCHNER H. Mineral Nutrition of Higher Plants. London: Academic Press. 2 ed. 1995.

MATIELLO, J.B. Clima e solos para o cafeeiro. In: O café: do cultivo ao consumo. São Paulo: Globo, p. 26-39, 1991.

MCBRIDE, M.B. 1994. Environmental chemistry of soils. Oxford University Press, New York.

MORUZZI, R.B. Ferro e Manganês em águas destinadas ao abastecimento. In: Tratamento de água de abastecimento, contendo ácido húmico complexada com ferro e manganês, utilizando a flotação por ar dissolvido conjugada à oxidação química. São Carlos. P. 214. 2000.

MULLER, C. Resposta fotossintética à toxidez de ferro em diferentes cultivares de arroz. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Viçosa. 2011.

MURGIA, I.; Delledonne, M.; Soave, C. Nitric oxide mediates iron-induced ferritin accumulation in Arabidopsis. The Plant Journal, v.30, p.521-528. 2002.

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES. Water quality criteria. Washington. DC, United States Environmental Protection Agency, p.592. 1972.

NENOVA, V. R. Growth and photosynthesis of pea plants under different iron supply. Acta Physiol Plant, v.31, p.385-391. 2009.

NEVES, N. R.; OLIVA, M. A.; CENTENO, D. C.; COSTA, A. C.; RIBAS, R. F.; PEREIRA, E. G. Photosynthesis and oxidative stress in the restinga plant species *Eugenia uniflora* L. exposed to simulated acid rain and iron ore dust deposition: Potential use in environmental risk assessment. Science of the Total Environment, v.407, p.3740–3745. 2009.

OIC. Trade Statistics. Disponível em:<http://www.ico.org/trade_statistics.asp>. Acessado em: 11 fev.2014.

OLIVEIRA, A.C. Diferentes concentrações de ferro na água, seu efeito na cultura do girassol ornamental e no desempenho de Gotejador. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP. 2010.

OLIVER, M. A. Soils and human health: a review. European Journal of Soil Science., v. 48, p. 573-592, 1997.

OTTOW, J. C. G.; BENCKISER, G.; WATANABE, I. Iron toxicity of rice as a multiple nutritional soil stress, in Proc. Int. Symp. On Distribution, Characteristics and Utilization of Problem Soils. Tropical Agriculture Research Center, Ibaraki, p. 167–179. 1982.

PEREIRA, E.G; OLIVA, M.A; ROSADO-SOUZA, L.; MENDES G.C; COLARES, D.S; STOPATO, C.H; ALMEIDA, A.M. Iron excess affects rice photosynthesis through stomatal and non-stomatal limitations. Plant Science, p. 201-202. 2013.

PIERANGELI, M.A.P.; GUILHERME, L.R.G.; CURI, N.; SILVA, M.L.N.; OLIVEIRA, L.R.; LIMA J.M. Teor total e capacidade máxima de adsorção de chumbo em latossolos brasileiros. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.25, p.279-288. 2001.

POLLARD, A.S.; PARR, A.J.; LOUGHMAN, B.C. Boron inrelation to membrane function in higher plants. Journal of Experimental Botany, v.28, p.831. 1977.

POLYAKOV, N.E.; KRUPPA, A.I.; LESHINA, T.V.; KONOVALOVA, T.A.; KISPERT, L.D. Carotenoids as Antioxidants: Spin Trapping EPR and Optical Study. *Free Radical Biology e Medicine*, v.31, p.43-52. 2001.

PRATT, P.F. Quality criteria for trace elements in irrigation water. California: California Agricultural Experiment Station, 1972. P. 46.

PREZOTTI, L.C.P.; BRAGANÇA, S.M.; MARTINS, A.G.; LANI, J.A. Importância econômica social e econômica do café conilon. In: FERRÃO, R.G., FONSECA, A.F.A., BRAGANÇA, S.M., FERRÃO, M.A.G., MUNER, L.H. (Eds.), *Café Conilon*, Seag/Incaper, Vitória, p. 331-343. 2007.

PUGH, R.E.; DICK, D.G. E FREDEEN, A.L. Heavy Metal (Pb, Zn, Cd, Fe, and Cu) Contents of Plant Foliage near the Anvil Range Lead/Zinc Mine, Faro, Yukon Territory. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v.52, p.273- 279. 2002.

RAVET, K.; TOURAINE, B.; BOUCHEREZ, J.; BRIAT, J.; GAYNARD, F.; CELLIER, F. Ferritins control interaction between iron homeostasis and oxidative stress in Arabidopsis. *The Plant Journal*, v.57, p. 400-412. 2009.

RENA, A. B.; MAESTRI, M. Fisiologia do cafeeiro. In: RENA, A.B.; MALAVOLTA, E.; ROCHA, M.; YAMADA, J. (Eds.), *Cultura do cafeeiro: fatores que afetam a produtividade do cafeeiro*. Piracicaba: Potafos, p. 13-85. 1986.

REDDY, K.R.; DELAUNE, R. Biogeochemistry of Wetlands: Science and Applications. CRC Press, Boca Raton, p. 435–443. 2008.

RICHTER, C.A.; NETO J. M. A. Tratamento de Água, tecnologia atualizada. Ed. Edgard Blucher. 1991.

ROGERS, E.E.; M.L. GUERINOT. Iron acquisition in plants. In: TEMPLETON, D.M., (Ed.). *Molecular and Cellular Iron Transport*. Dekker, New York, p. 359-393. 2002.

RÖMHELD, V.; MARSCHNER, H. Evidence for a specific uptake system for iron phytosiderophores in roots of grasses. *Plant Physiology*, v. 80, p175 – 180. 1986a.

RÖMHELD, V.; MARSCHNER, H. Mobilization of iron in the rhizosphere of different species. *Advances in Plant Nutrition*, v.2, p.155-204. 1986b.

RONCHI, C.P; DAMATTA, F.M. Importância econômica social e econômica do café conilon. In: FERRÃO RG, FONSECA AFA, BRAGANÇA SM, FERRÃO MAG, DE MUNER LH (Eds.), *Café Conilon*, Seag/Incaper, Vitória, p. 95-119. 2007.

ROTSTEIN, J. Brasil Século XXI. Rio de Janeiro: Espaço e Tempo. P.141. 1996.

ROWE, D.R.; ABDEL-MAGID, I.M.. Handbook of Wastewater Reclamation and Reuse. CRC Press, Inc. p.550. 1995.

SASS, J. E. Botanical Microtechnique. 2ª ed. Ames, The Iowa State College Press, Iowa. 1951.

SAHRAWAT, K. L. Managing iron toxicity in lowland rice: the role of tolerant genotypes and plant nutrients. In: TORIYAMA, K.; HEONG, K.L.; HARDY, B. (Eds), *Rice is life: scientific perspectives for the 21st century*, Tsukuba. 2005.

SAJWAN, K. S.; LINDSAY, W. L. Effects of redox on zinc deficiency in paddy rice. *Soil Science Society of America Journal*, v.50, p.1264–1269. 1988.

SEAGO, J.; MARSH, L.C.; STEVENS, K.J.; SOUK, U.P.A., VOTRUBOVA, O.; ENSTONE, D.E. A re-examination of the root cortex in wetland flowering plants with respect to aerenchyma, *Annals of Botany*, v. 96, p.565–579. 2005.

SHAINBERG, O.; RUBIN, B.; RABINOWITCH, H.D.; LIBAL, Y.; TELOR, E. Acclimation of beans to oxidative stress by treatment with sublethal iron levels. *Journal of Plant Physiology*, v.157, p. 93-99. 2000.

SILVA, A.I.S. Morfoanatomia e composição mineral de raízes de duas espécies de restinga submetidas ao excesso de ferro. Dissertação de mestrado - Universidade federal de Viçosa. 2009.

SILVA, I.N.; FONTES, L.O; TAVELLA, L.B.; OLIVEIRA, J.B.; OLIVEIRA, A.C. Qualidade de água na irrigação. *ACSA - Agropecuária Científica no Semi-Árido*, v.07, p. 01 – 15. 2011.

SILVA, J.G.F.; REIS, E.F. Importância econômica social e econômica do café conilon. In: FERRÃO RG, FONSECA AFA, BRAGANÇA SM, FERRÃO MAG, DE MUNER LH (Eds.), *Café Conilon*, Seag/Incaper, Vitória, p. 347-373. 2007.

SILVEIRA, V.C.; OLIVEIRA A.P.; SPEROTTO, R.A.; AMARAL, L.; DIAS, J.F.; CUNHA, J.B.; FETT, J.P. Influence of iron on mineral status of two Rice (*Oryza sativa* L.) cultivars. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, v.19, p. 127-139. 2007.

SINHA, A.; SAXENA, R. Effect of iron on lipid peroxidation, and enzymatic and non-enzymatic antioxidants and bacoside-A content in medicinal plant *Bacopa monnieri* L. *Chemosphere*, v.62, p.1340-1350. 2006.

SMIRNOFF, N. Ascorbate, tocopherol and carotenoids: metabolism, pathway engineering and functions. In: SMIRNOFF, N. (Ed.). *Antioxidants and reactive oxygen species in plants*. Blackwell Publishing Ltd. P. 53-86. 2005.

SNOWDEN, R.; WHEELER, B.D. Chemical changes in selected wetland plant species with increasing Fe supply, with specific reference to root precipitates and Fe tolerance. *New Phytologist*, v.131, p.503-520.1995.

STRASSER, A.; TSIMILLI-MICHAEL, M.; SRIVASTAVA, A.. Analysis of the fluorescence transient In: Papageorgiou, G. C.; Govindjee (eds.), *Chlorophyll fluorescence: A signature of photosynthesis*. *Advances in Photosynthesis and Respiration Series*. Springer: Dordrecht, p. 321-362, 2004.

SOUKUP, A.; ARMSTRONG, W.; SCHREIBER, L.; FRANKE, R.; VOTRUBOVÁ, O. Apoplastic barriers to radial oxygen loss and solute penetration: a chemical and functional comparison of the exodermis of two wetland species, *Phragmites australis* and *Glyceria maxima*. *New Phytologist*, v.173, p. 4–278. 2007.

SOUTO, R.A. Avaliação sanitária da água de irrigação e de alfaces (*Lactuca sativa* L.) produzidas no município de Lagoa Seca, Paraíba. Tese de Doutorado - Universidade Federal da Paraíba. 2005.

SOUZA-SANTOS, P.; RAMOS, R. S.; FERREIRA, S. T.; CARVALHO-ALVES, P. C.; Iron-induced oxidative damage of corn root plasma membrane H⁺-ATPase. *Biochimica et Biophysica Acta*, v.1512, p.357-366. 2001.

SPERLING, E.V. Considerações sobre a saúde de ambientes aquáticos. *Bio*, v.2, p.53-6. 1993.

SPILLER, S.; TERRY, N. Limiting Factors in Photosynthesis. II. Iron stress diminishes photochemical capacity by reducing the number of photosynthetic units. *Plant Physiology*, v.65: 121-125.1980.

STEIN, R.J. Excesso de ferro em arroz (*Oryza sativa* L.): efeitos tóxicos e mecanismos de tolerância em distintos genótipos. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2009.

SUH, H-J.; KIM, C.S.; LEE, J-Y.; JUNG, J. Photodynamic effect of iron excess on photosystem II function in pea plants. *Photochemistry and Photobiology*, v.75, p. 513-518. 2002.

TAIZ, L., ZEIGER, E. *Plant Physiology*. Sinauer Associates, 2^a ed. 1998.

TAYLOR, G.J.; CROWDER, A.A.; RODDEN, R. Formation and morphology of an iron plaque on the roots of *Typha latifolia* L. grown in solution culture. *American Journal of Botany*, v.71, p. 666-675.1984.

TAYLOR, S.E.; TERRY, N.; HUNSTON, R.P. Limiting Factors in Photosynthesis .III. Effects of iron nutrition on the activities of three regulatory enzymes of photosynthetic carbon metabolism. *Plant Physiology*, v.70, p.1541-1543 .1982.

THOMPSON, J. E.; LEDGE, R. L. The role of free radicals in senescence and wounding. *New Phytologist*, v.105, p.317–344. 1987.

TOSHIHIRO, Y.; FUMIYUKI, G.; KAZUHIRO, S.; YOSHIHISA, K. Cross relationships of Cu, Fe, Zn, Mn, and Cd accumulations in common *japonica* and *indica* rice cultivars in Japan. *Environmental and Experimental Botany*, v.68, p.180–187. 2010.

TRISTÃO, J. Perspectivas do mercado interno brasileiro de café. In: Simpósio estadual do café, 2., Vitória. Anais...Vitória, ES: Cetcaf,1995. p.36-42.

TSAI, T.; HUANG, H. Effects of iron excess on cell viability and mitogen-activated protein kinase activation in Rice roots. *Physiologia Plantarum*, v.127, p.583-592 .2006.

TSIMILLI-MICHAEL, M.; STRASSER, R. J. In Vivo Assessment of Estresse Impact on Plants' Vitality: Applications in Detecting and Evaluating the Beneficial Role of Mycorrhization on Host Plants. In: VARMA, A. (Ed). Mycorrhiza: State of the Art, Genetics and Molecular Biology, Eco-Function, Biotechnology, Eco-Physiology, Structure and Systematics, 3rd edition, Springer, p. 679-703. 2008.

TUNDISI, J. G. Água no século XXI: enfrentando a escassez. São Carlos: RiMa, IIE, p.248. 2003.

USDA, United States Department of Agriculture. Foreign Agricultural Service. Coffe: World Markets and Trade. Circular Series June 2013.

VANSUYT, G.; LOPEZ, F.; INZÉ, D.; BRIAT, J.F.; FOURCROY, P. Iron triggers a rapid induction of ascorbate peroxidase gene expression in *Brassica napus*, FEBS Lett, v. 410, p.1195–1200. 1997.

VISSER, E.J.W.; COLMER, T.D.; BLOM, C.W.P.M.; VOESENEK, L.A.C.J. Changes in growth, porosity, and radial oxygen loss from adventitious roots of selecte d mono- and dicotyle donous wetland species with contrasting types of aerenchyma. Plant Cell Environment, v. 23, p.1237–1245. 2000.

WELLBURN, A. R. The spectral determination of chlorophyll a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. Journal of Plant Physiology, v.144, p. 307–313, 1994.

WILSON, K.C. Mineral nutrition and fertilizer needs. In: CLIFFORD M.N., WILLSON, K.C. (eds), Coffee Botany, Biochemistry and production of beans and beverage, Croom Helm, London. p.135-156. 1985.

YOSHIHARA, T.; GOTO, F.; SHOJI, K.; KOHNO, Y.. Cross relationships of Cu, Fe, Zn, Mn, and Cd accumulations in common japonica and indica rice cultivars in Japan. Environmental and Experimental Botany, v. 68, p.180–187. 2010.

XING, W.; LI, D.; LIU, G. Antioxidative responses of *Elodea nuttallii* (Planch.) H. St. John to short-term iron exposure. Plant Physiology and Biochemistry, v. 48, p. 873-878. 2010.

ZINATI, G.; SHUAI, XIUFU. Management of Iron in Irrigation Water. NJ Agricultural Experiment Station, Rutgers, Cooperative Research e Extension. 2005.

ZHENG, L.; HUANG, F.; NARSAI, R.; WU, J. GIRAUD, E.; HE, F.; CHENG, L.; WANG, F.; WU, P.; WHELAN, J.; SHOU, H. Physiological and transcriptome analysis of iron and phosphorus interaction in rice seedlings. Plant Physiology, v.151, 262-274. 2009.

10. ANEXO

Tabela 8—Características físicas do solo utilizado como substrato do experimento.

Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	Classificação textural ⁽¹⁾
-----g/Kg-----				
447	97	182,666	273,333	Franco Argilo-Arenoso

⁽¹⁾ Classificação textural de acordo com a Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

Tabela 9—Características químicas do solo utilizado como substrato no experimento.

Unidade		Fe (mg/L)					
		0	10	40	120	200	400
Fósforo	mg/dm ³	161,60 ab	174,40 ab	184,80 a	152,00 ab	172,80 ab	121,60 b
Potássio	mg/dm ³	1392 ns	1644	1760	1658	1890	1404
Enxofre	mg/dm ³	75,20 bc	63,80 c	76,60 bc	96,40 ab	113,40 a	124,00 a
Cálcio	cmol	3,58 ns	3,66	3,64	3,92	3,94	3,42
Magnésio	cmol	3,34 ab	4,04 a	3,40 ab	2,78 b	3,16 ab	2,54 b
H+ Al	cmol	1,32 ns	1,34	1,38	1,46	1,42	1,38
pH	-	6,74 ns	6,96	6,84	6,80	7,00	7,06
Matéria Orgânica	dag/Kg	6,56 ns	6,12	5,82	5,80	5,72	5,24
Ferro	mg/dm ³	156,6 c	191,8 bc	217,6 bc	266,4 b	378,6 a	423,0 a
Zinco	mg/dm ³	10,40 ab	14,88 a	7,78 b	6,68 b	9,42 ab	6,78 b
Cobre	mg/dm ³	0,64 a	0,24 b	0,16 b	0,16 b	0,42 ab	0,22 b
Manganês	mg/dm ³	89,20 ns	67,80	65,20	58,40	71,20	52,80
Boro	mg/dm ³	0,90 ns	0,98	1,01	0,99	1,06	1,04
Sódio	mg/dm ³	604,00 b	872 ab	1012,00 ab	1032,00 ab	1264,00 a	1076,00 ab
Saturação de Bases	(%)	88,36 ns	89,70	89,32	88,12	89,36	87,10

Análises baseadas nos métodos descritos pela Embrapa (1997). Médias obtidas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade (n=5).